JAMES S. TREFIL

EL PANORAMA INESPERADO

BIBLIOTECA CIENTIFICA SALVAT

Biblioteca Científica Salvat

James S. Trefil

El panorama inesperado

La naturaleza vista por un físico

SALVAT

Versión española de la obra original norteamericana *The unexpected vista.*
publicada por Charles Scribner's Sons de Nueva York
Traducción: Miquel Muntaner

Edición digital: Sargont (2017)

ISBN 0-684-1769-9 Edición original
ISBN: 84-345-8246-5 Obra completa
ISBN. 84-345-8377-1
Publicada por Salvat Editores. S.A.
Printed in Spain

INDICE

Con un profundo sentimiento de gratitud dedico este libro a la memoria de mis abuelos:
Tomas Trefil que construyó
Karel Mestek, que recordó

INTRODUCCIÓN

Una de las grandes satisfacciones del excursionista es seguir un sendero y llegar, de repente y sin previo aviso, a la cima de una montaña o a un claro del bosque y contemplar el panorama que se abre a sus pies. A menudo la perspectiva de la cascada lejana o de las montañas perdiéndose en la distancia se convierte en el recuerdo principal de toda la excursión.

También en la vida intelectual se dan experiencias de este tipo. El momento del «¡Ajá!» —que los dibujantes suelen representar con una bombilla encendiéndose sobre la cabeza de alguien— es un acontecimiento parecido. Lo mismo sucede cuando se descubre inesperadamente que dos cosas aparentemente inconexas están en realidad íntimamente relacionadas una con otra. Pero si bien todos los excursionistas que pasen por un sendero dado verán el mismo paisaje, el panorama intelectual se caracteriza porque cada persona que llega a él puede ver algo enteramente distinto.

Imaginemos por ejemplo una fila de automovilistas detenidos ante un semáforo. Todos ellos están mirando lo mismo: una caja amarilla y rectangular con tres luces de color. Sin embargo, es posible, incluso probable, que cada uno *vea* algo muy diferente de los demás. Supongamos que la primera persona de la fila sea un ingeniero eléctrico. Para él el semáforo no es más que un apéndice de una gran red actuada por ordenador que regula el movimiento de los vehículos por el centro de la ciudad. Si insistiéramos para que diera un paso más y describiera más a fondo su idea de los semáforos, quizás empezaría a divagar sobre la luz como ejemplo particular de los sistemas de control y acabaría hablando del sistema de control mejor diseñado que existe, el cerebro humano.

El conductor del segundo coche de la fila es un representante de una gran empresa industrial. Para él el semáforo es un artículo fabricado en una empresa y vendido luego a la ciudad. Después de pensar un momento, quizá se pondría a hablar sobre el gran tejido interconectado de actividades económicas, desde la minería hasta las tareas de mantenimiento, sin cuya exis-

tencia previa sería imposible imaginar un semáforo. Podría incluso ofrecemos al final algunas especulaciones generales sobre los seres humanos en su calidad de animales constructores de herramientas.

En el tercer coche hay un abogado. El semáforo podría simbolizar para él el conjunto de leyes que los seres humanos han elaborado. El aspecto mecánico o económico del aparato sería mucho menos importante que las reglas de conducta que simboliza, pues en cada momento dado hay miles de coches circulando por una ciudad, y casi todos los conductores respetan las señales de tráfico. Nuestro abogado puede descubrir detrás de esta manifestación de obediencia masiva, la vasta estructura del moderno sistema legal, desde los legisladores hasta los tribunales, pasando por la policía. Si insistiéramos podría ponerse a especular sobre los aspectos del carácter humano que exigen la existencia de un tal sistema para que grandes grupos de personas puedan vivir juntos en relativa armonía.

Cada uno de los conductores considera el semáforo como parte de una gran red de interconexiones. Aquel sencillo aparato se transforma en un aspecto de un sistema importante que gobierna alguna parte de nuestras vidas. El semáforo es en cierto sentido como un objeto situado en primer término de una pintura que representa algún maravilloso paisaje medieval: es un recurso utilizado por el artista para que miremos más adentro y contemplemos el rico tapiz de naturaleza y civilización situado detrás suyo. Voy a llamar panorama a la perspectiva que cada conductor tiene del semáforo, para insistir así en la amplitud de sus connotaciones.

El semáforo nos imparte, pues, varias lecciones importantes. Nos enseña que en realidad la amplitud y la profundidad del panorama poco tienen que ver con el objeto que captó nuestra atención. Depende primariamente de la persona que esté mirando al aparato, y sobre todo de su formación y de sus hábitos mentales, que el semáforo se vea como un simple aparato mecánico aislado o como parte de un sistema mucho mayor.

El semáforo nos enseña también que cuando dos personas miran la misma cosa no contemplan necesariamente el mismo panorama. Es casi como si al llegar dos excursionistas al mismo punto del sendero vieran el uno una cascada y el otro un bosque umbrío. A menudo para tener una imagen del mundo enteramente distinta basta con hablar con personas cuya educación y antecedentes les llevan a ver panoramas distintos de los nuestros.

Los científicos, como los demás profesionales, tienen también sus panoramas propios. Sería erróneo, sin embargo, suponer que todos los científicos comparten una visión común de las cosas. En los varios años que pasé formando parte de un equipo interdisciplinario de investigación sobre el cáncer, me sorprendía con frecuencia comprobar hasta qué punto la formación de los demás miembros del equipo afectaba la visión que tenían de nuestro trabajo. Una célula para un biólogo es una parte de un sistema vivo que crece y evoluciona; para un físico es una «caja negra» que procesa energía y produce un sistema ordenado; para un estadístico es un bit más de datos que debe introducir en un programa de computador. Es evidente que no existe un panorama «científico» único y monolítico.

Mi intención al escribir este libro es compartir con el lector algunos de los panoramas que captan las personas formadas dentro de la física, la ciencia que se ocupa de las leyes de la materia y del movimiento, y que como tal se centra primariamente en el mundo inanimado. El crecimiento de disciplinas como la biofísica y la física médica ha tendido a desdibujar la línea divisoria entre las ciencias físicas y las ciencias de la vida, pero los conocimientos procedentes de estas disciplinas todavía no se han difundido ampliamente dentro de la colectividad de los físicos. Por ello continúa todavía muy vigente la idea de que la física se limita al estudio de los sistemas no vivientes.

Hay dos aspectos de los panoramas captados por los físicos que son lo bastante insólitos como para merecer una mención especial. En primer lugar muchos aspectos de los panoramas de los físicos son inesperados y sorprendentes, y en segundo lugar, los panoramas a menudo presentan un grado sorprendente de interconexión. Estas dos propiedades están relacionadas con un único rasgo de la disciplina: su tendencia a considerar grandes conjuntos de fenómenos gobernados por unas cuantas leyes básicas de la naturaleza.

Hacia fines del siglo XIX, los físicos habían construido explicaciones correctas del movimiento de los objetos materiales (un campo llamado mecánica), del comportamiento del calor (termodinámica) y de las propiedades magnéticas y eléctricas de la materia. Cada uno de estos tres dominios se consideraba gobernado por unas pocas leyes generales. Se consideraba, por ejemplo, que la mecánica no era más que un desarrollo de las Tres Le-

yes del Movimiento de Newton. Todos los efectos del calor y de la temperatura se subsumían debajo de las Tres Leyes de la Termodinámica (dos de las cuales se discuten en los capítulos 1 y 8). Cuatro relaciones llamadas Ecuaciones de Maxwell (v. cap. 12) gobernaban la electricidad y el magnetismo. Podía decirse de este modo que todo lo que sucedía en el mundo material constituía un caso especial de sólo diez leyes generales, las cuales era posible escribir, de modo estrictamente literal, en el dorso de un sobre corriente.

Durante los últimos años han aparecido unos cuantos libros de tipo popular en los que se afirma que el siglo XX nos ha alejado de este concepto de la ley natural, acercándonos hacia una visión del universo más mística (y menos mecanicista). ¡No hay afirmación más errónea! Las leyes de la mecánica cuántica son diferentes de los otros tipos de leyes físicas mencionadas, pero es lógico que así sea, porque se ocupan de un tipo diferente de objeto. Al fin y al cabo un electrón no es una pelota de béisbol ni un satélite. En el capítulo 4 trataré más a fondo un aspecto de esta cuestión, pero la cito aquí para señalar que la mayoría de físicos en activo no están dispuestos a tragarse una visión mística de la naturaleza.

De hecho, manteniéndonos en el espíritu de la física clásica, podemos decir que lo único sucedido en este siglo es que se han añadido al repertorio clásico dos nuevos campos de estudio: la relatividad (v. cap. 2) y el estudio del comportamiento de los sistemas atómico y subatómico, o sea la disciplina llamada mecánica cuántica. La relatividad, que abarca el comportamiento de los objetos que se mueven a una velocidad cercana a la de la luz y que ofrece además nuestra mejor teoría actual de la gravitación, deriva de una única ley, el llamado principio de relatividad. Y si bien hay alguna discusión sobre los detalles de las leyes fundamentales de la mecánica cuántica, es evidente que su número es reducido. Puede decirse por lo tanto que, en opinión de la física moderna, el comportamiento de todo lo existente en el mundo, desde la mayor estrella hasta el átomo más diminuto, está gobernado por no más de quince principios generales o leyes de la naturaleza.

Esta situación tiene un profundo efecto sobre el panorama del físico. Si en último extremo hay que relacionar todos los fenómenos incontables del Universo con sólo quince leyes, se deduce que muchos de estos fenómenos, totalmente inconexos superficialmente, deben tener raíces comunes. Y así,

a medida que nuestro punto de vista se desplaza de los fenómenos superficiales a los ámbitos distantes de nuestro panorama, descubrimos que muchos panoramas más están convergiendo hacia el mismo punto final, y debajo de la superficie observamos un denso tejido de interconexiones.

Esto sugiere otro aspecto del panorama del físico: las conclusiones inesperadas a las que podemos llegar. Puesto que incluso los acontecimientos más triviales están relacionados en último extremo con las leyes que gobiernan todo el universo físico, a menudo cuando uno piensa sobre este acontecimiento se ve arrastrado hacia cuestiones de profundo contenido intelectual. Podemos empezar pensando, por ejemplo, en una masa flotante de petróleo y encontramos inesperadamente meditando sobre esta sustancia que llamamos materia. O podemos empezar describiendo el plano de una ciudad inglesa del siglo XV y acabar pensando en el principio mismo del Universo hace unos 15.000 millones de años. Podemos empezar mirando un frigorífico normal de cocina y finalizar en la otra punta del tiempo, contemplando el destino final del Universo. En otros casos los panoramas no serán tan largos, pero confío que cada ejemplo de este libro transmita la idea de un Universo donde los acontecimientos y los objetos están enlazados entre sí dentro de un tejido cuyos orígenes últimos residen en las leyes de la naturaleza. Quizás entonces podremos maravillamos, como Einstein, ante el hecho incomprensible de que el Universo sea comprensible.

Son dos los motivos que me han impulsado a presentar al lector los panoramas de la física. Creo en primer lugar que uno de los grandes logros del intelecto humano ha sido comprender que la infinita variedad de cosas que vemos en el mundo material puede reducirse a un puñado de leyes generales. Es algo que merece explicarse e incluso celebrarse. En segundo lugar, aunque vivimos en una época en la que las actividades de la ciencia empiezan a presentarse de modo comprensible al público en general (al contrario de la situación existente hace una década) se presta demasiada atención a lo nuevo y a lo espectacular. Con demasiada frecuencia la información se centra en las nuevas tecnologías e ignora completamente la trabazón filosófica de las disciplinas que hacen posibles estas tecnologías. De este modo, el público en general se ve privado de la posibilidad de compartir las riquezas que contiene la visión científica del mundo, una visión que les permitirá apreciar mejor la ciencia moderna.

Antes de examinar con más detalle algunos panoramas particulares, debemos atender a unos cuantos hechos preliminares. A veces convendrá expresar números muy grandes o muy pequeños en «potencias de diez» o sea en notación «científica». Las reglas de esta notación son las siguientes:

Todo número se expresa como un número entre 1 y 10 multiplicado por 10 elevado a una determinada potencia.

Si este número está elevado a una potencia positiva, habrá que mover el punto decimal tantos lugares hacia la derecha como indique la potencia de 10 (así por ejemplo el número 8.000 se escribe 8×10^3).

Si la potencia de diez es negativa, el punto decimal se desplaza hacia la izquierda (0,002 se escribirá 2×10^{-3}).

Algunos números corrientes expresados en esta notación son:

10^{-8} cm el tamaño de un átomo.

10^{-13} cm el tamaño de un núcleo.

10^{10} años la edad aproximada del Universo.

La utilización que se hace en el texto de los términos *átomo* y *molécula* puede parecer de entrada algo confusa. Estos términos se utilizarán de modo usual, refiriéndose el *átomo* a un único elemento químico y la *molécula* a un conjunto de átomos unidos entre sí. En general, cuando desee hablar de los constituyentes fundamentales de la materia sin referirme a ningún material específico, utilizaré *átomo* como término genérico. Cuando el texto se refiera a un material específico, como el agua (que sólo existe en forma molecular), utilizaré el término *molécula*. Si esta distinción parece demasiado pedante, en lo que sigue pueden considerarse intercambiables los términos *átomo* y *molécula*.

Cuando la discusión se centre en la estructura del átomo, utilizaré los términos siguientes sin más explicaciones:

Electrón: partícula ligera, de carga negativa, que se mueve normalmente en órbitas alrededor del núcleo atómico.

Protón: partícula de carga positiva cuyo peso es 1.836 veces el del electrón, y que se encuentra normalmente en el núcleo del átomo.

Neutrón: partícula de peso igual al del protón pero sin carga eléctrica, que también se encuentra normalmente en el núcleo del átomo.

Quisiera dar las gracias finalmente a varias personas que han figurado de modo destacado en la elaboración de este libro. Charles Scribner, Jr.,

proporcionó la idea inicial que lo puso en marcha y luego dedicó una cantidad de tiempo desmesurada a repasar el manuscrito a lo largo de sus muchas transformaciones, para que al final todo saliera correctamente. La señora Nancy Lañe conservó su habitual buen humor mientras preparaba el manuscrito y le daba los retoques finales. La señora Judith Peatross hizo las ilustraciones, a pesar de tener que cuidar de su nuevo hijo. Bob Moran rebuscó alegremente por toda la red de bibliotecas del estado de Montana para encontrar citas bibliográficas poco corrientes. Gracias a todos vosotros.

James S. Trefil

I. CUBOS DE ENERGÍA

No hay nada tan agradable en una noche de invierno como un fuego encendido en la chimenea. El calor de las llamas parece poseer un encanto especial que es incapaz de ofrecer la calefacción central, aunque un físico pueda decimos que los dos tipos de calor son idénticos. Si nos ponemos a pensar un momento, recordaremos que el calor generado al quemar madera o carbón puede aprovecharse con máquinas y utilizarse para levantar pesos o para desplazar un vehículo. Sin embargo, cuando cogemos con la mano un trozo de madera o de carbón no se mueve ni da calor al tacto. ¿Cómo puede una cosa tan inerte producir todos estos efectos?

La cuestión no es nada sencilla. Algunos de los mejores cerebros en la historia de la ciencia se dieron un tropezón al tratar el tema de la relación entre calor y movimiento, y la cuestión no quedó resuelta de modo definitivo hasta fines del siglo XIX. La dificultad reside en que no hay una conexión obvia entre una cantidad de combustible, una llama y el trabajo que puede efectuarse utilizando esta llama. Sabemos que estos elementos están relacionados entre sí, y en la vida moderna utilizamos diversos combustibles para producir calor y energía, aunque quizá personalmente no comprendamos los principios físicos subyacentes. Cuando, por ejemplo, apretamos un interruptor para encender una luz, utilizamos el producto final de un proceso en el cual se calienta agua para producir vapor, el vapor se utiliza para producir electricidad y la electricidad se transporta a nuestro hogar. Por lo tanto, los sistemas utilizados para transformar el calor en trabajo útil tienen una importancia práctica inmensa.

El problema básico con que tropezaron los científicos cuando intentaron poner algo de orden en sus ideas sobre el calor es el que ya hemos indicado: la falta de una conexión evidente entre el calor y el movimiento a gran escala que causa. A consecuencia de esto se pensó que el calor tenía que estar relacionado con algún tipo de fluido que entraba y salía de los cuerpos cuando éstos experimentaban cambios de temperatura. El fluido recibió el nombre de calórico. Efectos tan corrientes como el calentamiento

de dos palitos al frotarlos entre sí se explicaban en función del «fluido calórico» que se desprendía de sus puntos normales de descanso en el sólido y se manifestaba como calor. Según esta teoría, la cantidad de polvo producida frotando y la cantidad de calor generada tenían que ser aproximadamente proporcionales. Cuanto más polvo, más fluido calórico tenía que haber quedado suelto, y esto a su vez implicaba más calor.

La primera prueba experimental contra la teoría calórica del calor la ofreció en 1798 Benjamin Thompson (más tarde el conde Rumford). Thompson, nacido en Massachusetts, marchó de América después de la Revolución, principalmente porque había apoyado de modo activo la causa tory. Se convirtió en un aventurero militar, en un galanteador y en un pícaro errante por Europa. Consiguió su título del Elector de Baviera por sus servicios en el ejército, y su contacto con la teoría calórica se produjo mientras supervisaba la fabricación de cañones. En aquella época era muy corriente barrenar los cañones para darles el calibre exigido militarmente. Esto se hacía girando el cañón para que su parte interior o calibre entrara en contacto con un barreno metálico afilado. A medida que el cañón giraba, el barreno cortaba trozos de bronce y el cañón se calentaba. Rumford, contrariamente a lo que podía esperarse de la teoría calórica, creyó observar que cuantos menos recortes o fragmentos de bronce había, más se calentaban los cañones. Dedujo que esto se debía al filo del barreno: cuanto más afilado estaba, más recortes había y menos calor se generaba. En cambio un barreno embotado calentaba el cañón sin apenas hacer trabajo de corte. Además parecía que, con independencia de la mayor o menor cantidad de recortes producidos, podía generarse continuamente calor con tal de que hubiera energía para girar el cañón. Rumford se tomó incluso la molestia de sumergir el aparato entero de tornear cañones en un recipiente con agua y demostrar que podía hacer hervir el agua. En otras palabras, demostró de modo conclusivo que el movimiento mecánico podía producir calor, del mismo modo que la máquina de vapor había demostrado que el calor podía producir un movimiento mecánico. Este hecho debería haber asegurado inmediatamente una conexión lógica entre el calor y la energía, pero esta relación no se aceptó de modo definitivo hasta casi medio siglo después. Mientras tanto la obra de Rumford recibió la benigna desatención que los científicos reservan para los resultados incómodos pero irrefutables.

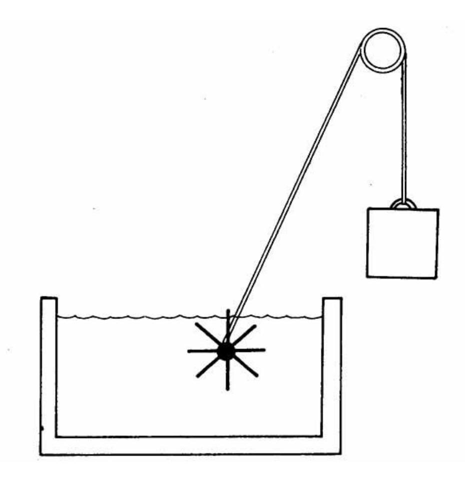


Fig. 1

El hombre que demostró finalmente la relación existente entre el calor y el movimiento mecánico fue un científico amateur, independiente y acomodado, de Manches- ter, Inglaterra, llamado James Prescott Joule. En mayo de 1847 publicó una nota en el *Manchester Couríer* anunciando que daría una conferencia en la sala de lecturas de la iglesia de Santa Ana titulada «Materia, fuego vivo y calor». Es probable que aquél fuera el escenario más insólito utilizado nunca para anunciar un gran descubrimiento científico. Joule describió una serie de laboriosos estudios experimentales con los cuales demostraba que existe una equivalencia muy precisa entre el calor y diferentes tipos de energía. La figura 1 muestra uno de estos experimentos. Joule levantó un gran peso y lo dejó caer a continuación de modo que hiciera girar una rueda de paletas sumergida en un depósito de agua. Midió la temperatura del agua antes y después de la caída y descubrió que la temperatura había aumentado. Puesto que la temperatura aumentó, el proceso utilizado por Joule debió de haber convertido necesariamente el movimiento mecánico (la caída del peso) en calor. Experimentos similares con bobinas calefactores demostraron que podía conseguirse el mismo efecto utilizando electricidad, y Joule llegó a la conclusión de que las formas convencionales de energía podían convertirse en calor, del mismo modo que el calor podía convertirse en energía de movimiento. Cuando la

comunidad científica aceptó estos experimentos, la vieja teoría calórica quedó finalmente archivada. Ahora estaba demostrado que el calor era una forma de energía y no un tipo de fluido especial que impregnaba los materiales.

¿Pero qué significa esto? Cuando los físicos utilizan el término *energía*, piensan en una definición precisa, una definición que puede corresponderse o no con el uso coloquial del término. Cuando dicen que algo tiene energía, significan con ello que puede ejercer una fuerza a lo largo de una distancia. Por ejemplo, la mezcla en explosión de gasolina y aire dentro del cilindro de un automóvil posee energía porque puede obligar a bajar al pistón y consecuentemente puede impulsar hacia delante al coche contra las fuerzas de fricción de la carretera y contra la resistencia del aire. Cuando una fuerza actúa a lo largo de una distancia decimos que se realiza «trabajo», de modo que la energía puede definirse como la capacidad de realizar trabajo.

En general, los físicos del siglo XIX reconocieron dos grandes categorías de energía: la energía asociada con el movimiento (energía cinética) y la energía asociada con la posición (energía potencial). Una pelota de béisbol en movimiento es un ejemplo de un objeto dotado de energía cinética. Cuando un jugador la coge, la pelota ejerce una fuerza sobre su guante, una fuerza que actúa a lo largo de una distancia (pequeña) comprimiendo el relleno del guante. Aunque la pelota dé contra un objeto tan rígido como una pared de hormigón, se producirá alguna deformación de la pared (y de la pelota) cuando se ejerzan las correspondientes fuerzas. O sea, que la pelota, gracias a su movimiento, puede ejercer una fuerza a lo largo de una distancia (puede hacer trabajo) y, por lo tanto, posee energía, según la definición que hemos dado de este término.

Puede ilustrarse la energía asociada con la posición, o energía potencial, aguantando este libro por encima del suelo con el brazo extendido. Mientras el libro permanece estacionario, no se hace trabajo y no se gasta energía. Pero es evidente que podemos obligar al libro a hacer trabajo soltándolo simplemente. Por lo tanto, el libro tiene la capacidad potencial de realizar un trabajo, aunque no lo realice en este momento concreto. Decimos que el libro posee energía potencial.

Sin embargo, la energía potencial que tiene el libro depende de su posición. Si estuviera sobre el suelo no podría hacer trabajo. Además la experiencia nos enseña que cuanto más alto esté el libro sobre el suelo, mayor

será el impacto producido cuando choque contra él, y por lo tanto más trabajo podrá realizar, es decir, que mayor será su energía. Es la gravedad lo que proporciona al libro su capacidad de movimiento cuando lo soltamos, por lo tanto hablamos aquí de una energía potencial gravitatoria.

Si volvemos un momento al experimento de Joule, comprenderemos que el peso elevado posee precisamente este tipo de energía, y que la energía potencial del peso se convierte en la energía cinética de la rueda de paletas a medida que el peso cae. Podemos dar un paso más en esta cadena de razonamientos. Al comenzar el experimento alguien (o algo) tuvo que levantar el peso, tuvo que ejercer la fuerza suficiente para superar la fuerza atractiva de la gravedad sobre el peso a lo largo de toda la distancia desde el suelo hasta el punto superior de descanso. En otras palabras, hubo que gastar energía para levantar el peso. Probablemente esta energía procedía de los músculos de los ayudantes de laboratorio de Joule, del mismo modo que en un laboratorio moderno de investigación la proporcionarían los licenciados. Ésta es, pues, la energía que el peso gasta cuando desciende y que la cuerda transfiere a las paletas de la rueda.

Esta manera de mirar las cosas sugiere una especie de proceso equilibrador en la naturaleza. Para que un sistema pueda gastar energía primero debe adquirirla, y la cantidad gastada debería ser igual a la cantidad suministrada. De hecho siempre será así mientras limitemos nuestra atención a las energías potencial y cinética. Quizás el mejor ejemplo de este tipo de equilibrio energético nos lo den las montañas rusas. Cuando el carrito inicia su carrera, la energía, que ha sido suministrada por el motor elevador, es puramente potencial. Cuando el carrito empieza a bajar por la vía, parte de esa energía se convierte en energía cinética y el carrito acelera, con la consiguiente alegría de sus ocupantes. En el fondo de la primera bajada, la conversión es completa: toda la energía potencial original se ha convertido en energía cinética. Cuando el carrito empieza a subir de nuevo, se inicia el proceso contrario y la energía cinética se convierte de nuevo en energía potencial. Si no hubiera fricción el proceso continuaría indefinidamente. La energía total del sistema permanecería inalterada, pero la proporción de cada una de las dos categorías se iría desplazando continuamente. Los físicos llaman a esto ley de conservación. Esté donde esté el sistema, a medida que transcurre el tiempo su energía total se mantiene igual (es decir se conserva).

Esta pulcra manera de mirar el mundo, en la que ciertas cantidades son fijas e inmutables, es muy atractiva. De hecho puede entenderse hasta qué punto es atractiva considerando la angustia que produjo la cuestión de la naturaleza del calor entre los científicos del siglo XIX. Porque si pensamos en el final del experimento de Joule, nos damos cuenta de que la energía potencial original ha desaparecido (al fin y al cabo, el peso está de nuevo en el suelo) pero al mismo tiempo la rueda de paletas y el agua han quedado estacionarias. Parece como si la energía se hubiera simplemente desvanecido. El hecho de que el agua esté más caliente que al principio es interesante, desde luego, pero si sólo tenemos en cuenta en la suma final los tipos de energía discutidos hasta ahora, el hecho carece también de importancia. La gran contribución de Joule a la ciencia fue demostrar que la cantidad de calor generada es exactamente la necesaria para equilibrar la suma de energías. Con este argumento pudo convencer a sus colegas de que el calor no era más que una tercera categoría en la cual podía transformarse la energía.

Esta conclusión no debería de habernos sorprendido contemplada con nuestros conocimientos modernos. Sabemos que el agua está compuesta de moléculas. Si imaginamos la rueda de paletas abriéndose camino a través de un conjunto de moléculas de este tipo, comprenderemos que tendrá que acelerarlas. Por lo tanto, la energía potencial del peso, considerada a escala atómica, no ha desaparecido sin más; ha servido para aumentar la energía cinética de las moléculas del agua. Esta mayor velocidad molecular se percibe en forma de un aumento de temperatura. La obra de Joule demostró que el calor no era una especie de sustancia misteriosa que podía destruir energía, sino simplemente energía en una forma no reconocida hasta entonces. Trabajos adicionales de Joule y de otros no sólo verificaron esta afirmación, sino que demostraron que la cantidad de energía convertida en calor es siempre igual a la diferencia entre las energías original y final del sistema.

Por lo tanto, la concepción atractiva de la naturaleza en la que la energía se conserva siempre, y en la que los cambios aparentes no son más que conversiones de energía de una forma a otra, queda de nuevo restaurada si reconocemos que el calor es una forma especial de la energía cinética. Podemos resumir este resultado del siguiente modo:

El calor es una forma de energía, y la energía siempre se conserva.

Ésta es la expresión de la llamada Primera Ley de la Termodinámica.

Hay una analogía útil que puede ayudamos a comprender este principio. Imaginemos una serie de cubos o baldes, cada uno con una etiqueta diferente. Una etiqueta podría rezar «energía potencial gravitatoria», otra «calor», otra «energía cinética», etc. Si tenemos un litro de agua podemos decidir guardarlo todo en un cubo, o podemos trasladarlo de un cubo a otro, o podemos distribuirlo entre los cubos. Pero hagamos lo que hagamos, siempre habrá un litro de agua en el sistema. De un modo exactamente análogo, la energía total de cualquier sistema aislado será siempre la misma, aunque la traslademos arbitrariamente entre los distintos «cubos».

Los hechos que llevaron a la formulación de la Primera Ley nos permiten aprender una lección muy importante. Siempre que nos encontremos con una situación en la que parece que se haya creado o que se haya destruido energía, nuestra primera preocupación será comprobar si hemos descontado algún cubo. Antes de Joule, el cubo que faltaba era el que lleva la etiqueta de «calor», y la contribución de aquel científico fue comprender que si incluimos al calor en nuestras cuentas podemos eliminar el aparente desequilibrio.

Joule fue el primero en asentar sobre una base experimental firme la conservación de la energía, pero Julius Robert von Mayer, un médico alemán que trabajaba en Java llegó a la misma conclusión por un camino diferente. Von Mayer observó que la sangre venosa de sus pacientes tenía un color rojo mucho más brillante en los trópicos que en Europa. Pensó que este efecto se debía a que el cuerpo del paciente extraía menos oxígeno de la sangre arterial porque en los trópicos necesitaba generar menos calor, que en climas más fríos, para mantener una temperatura normal del cuerpo. Llegó entonces a la conclusión de que el calor del cuerpo debía proceder de la energía almacenada en los alimentos, y obtuvo así el mismo resultado sobre la conservación de la energía que el demostrado por Joule en sus laboratorios.

Pensemos ahora de nuevo en un fuego de leña. Tenemos aquí una creación aparente de energía: el trozo de madera que echamos al fuego no tiene ni energía gravitatoria, ni energía cinética, y sin embargo produce calor. ¿Cómo podemos reconciliar esto con la Primera Ley? Si queremos seguir

la pista de nuestro precedente histórico, nuestro primer intento para resolver el dilema debería centrarse en la posibilidad de que estemos pasando por alto alguna categoría de energía.

Como hicimos con el calor, podemos descubrir este tipo desconocido de energía pensando a nivel microscópico. Sabemos que un átomo tiene una estructura parecida a la de la figura 2, con unos electrones cargados negativamente que giran alrededor de un núcleo cargado positivamente. Las cargas eléctricas de signo opuesto se atraen mutuamente, por lo tanto, sabemos que si deseamos desplazar un electrón del punto A al punto B tendremos que aplicar una fuerza a lo largo de una distancia, es decir, que tendremos que aplicar un trabajo. El electrón, al situarse en el punto B, deberá haber adquirido energía en virtud de su posición, del mismo modo que un libro levantado desde el suelo a la altura del hombro ha adquirido una energía potencial gravitatoria. Si el electrón cayera de nuevo al punto A, la energía que había adquirido antes se convertiría en energía de movimiento, del mismo modo que un objeto al caer convierte energía potencial gravitatoria en energía de movimiento. De hecho, existe una analogía clara entre la energía que un electrón posee debido a su posición en el átomo y la energía que un objeto pesado tiene debido a su altura sobre la Tierra. Por lo tanto, podemos hablar de la «energía potencial eléctrica» y agregar este nuevo «cubo» a nuestra anterior colección.

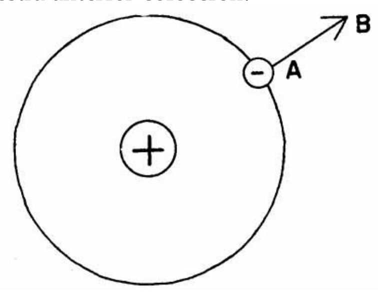


Fig. 2

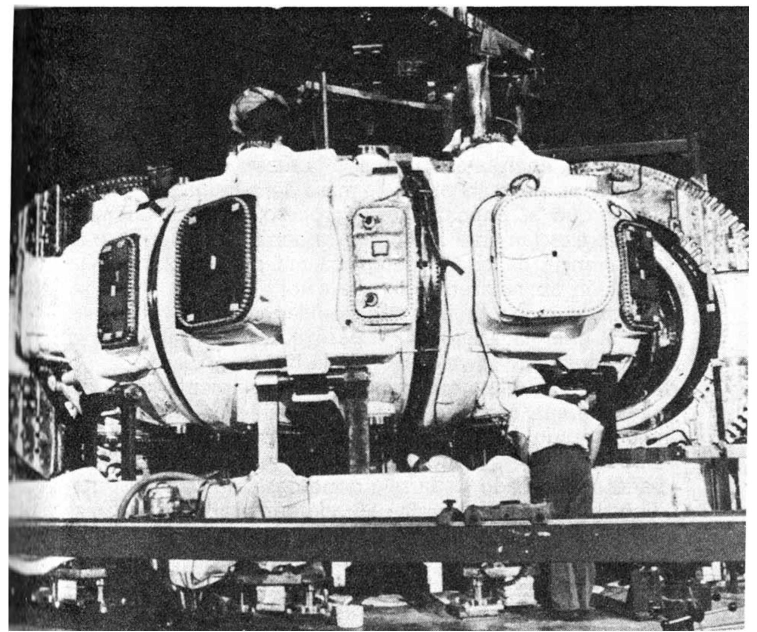
Un átomo o una molécula dada tendrán siempre alguna energía eléctrica almacenada en sus electrones debido a la posición que ocupan. Esta energía a veces se llama energía potencial química. La madera, el carbón y otros combustibles no constituyen ninguna excepción a esta regla, a pesar de que

sus moléculas a menudo son muy complicadas. En el proceso de la combustión, estas moléculas complejas se combinan con el oxígeno descomponiéndose en muchas moléculas más pequeñas (la más común de las cuales es el dióxido de carbono). Cada una de estas moléculas más pequeñas tiene también una cierta cantidad de energía almacenada en sus electrones en virtud de la posición que éstos ocupan. Por lo tanto, al analizar el fuego de leña entran en juego tres energías: la energía potencial eléctrica almacenada en la madera original y en las moléculas de oxígeno, la energía potencial eléctrica almacenada en los productos finales de la combustión y el calor producido por el fuego. La aritmética necesaria para el cálculo es algo complicada, pero puede demostrarse que la energía potencial eléctrica después de la combustión es inferior a la de antes. Si comparamos este déficit energético con la cantidad de calor producido por el fuego encontraremos que son iguales. Por lo tanto, la combustión sólo convierte la energía potencial eléctrica en calor. Vemos también ahora que la introducción de una nueva categoría de energía restablece la ley de conservación que parecía violada.

La combustión es un ejemplo más de las reacciones en las que se intercambian energía potencial eléctrica y calor. Hay otras reacciones (como las que se dan al cocinar) en las que el proceso sigue la dirección inversa. Se agrega energía calorífica a un sistema para iniciar reacciones químicas, y la energía eléctrica almacenada es mayor después de la reacción que antes. Pero en todos los casos la Primera Ley se mantiene.

A fines del siglo XIX tuvo lugar una controversia muy interesante y poco conocida centrada en el tema de la conservación de la energía. Intervino en el debate William Thomson (el barón Kelvin) quien se había ocupado de convertir los cuidadosos resultados experimentales de Joule en una formulación, matemáticamente rigurosa y de gran trascendencia, de la conservación universal de la energía. El tema de la controversia era el proceso que permitía al Sol radiar tanta energía al espacio que le rodea. Es relativamente sencillo calcular la energía que el Sol está produciendo. Sabemos la cantidad de energía que incide sobre las capas superiores de la atmósfera de la Tierra: aproximadamente 1,4 kilovatios por metro cuadrado. Si imaginamos una esfera con un radio igual al de la órbita de la Tierra y con centro en el Sol, podemos entender que la misma cantidad de energía citada atraviesa cada metro cuadrado de la superficie de esta esfera. Además sabemos que la energía total emitida por el Sol y la energía del Sol. Dedujo

de sus cálculos que, por imperativos de la Primera Ley, el Sol sólo podía haber existido de la esfera en metros cuadrados por 1,4 kilovatios tendremos la cantidad total de energía emitida por el Sol cada segundo. Como era de esperar, la cantidad de energía radiada resulta astronómica, en los dos sentidos de la palabra.



Tokamak, un reactor experimental de fusión, en construcción en el Laboratorio de Física del Plasma de Princeton. Foto cedida por la Universidad de Princeton.

Kelvin sólo conocía dos fuentes de donde extraer energía solar: las reacciones químicas que convierten la energía eléctrica en calor, y el potencial gravitatorio del Sol. Si el Sol se fuera contrayendo lentamente, las partículas al acercarse hacia el centro perderían energía potencial gravitatoria. Kelvin creía que ésta era la fuente de la energía del Sol. Dedujo de sus cálculos que, por imperativos de la Primera Ley, el Sol sólo podía haber existido desde hacía muy poco tiempo: unos 100 millones de años, más o

menos. Esta afirmación, procedente del más famoso físico de la época, provocó gran sensación en un momento en que los geólogos y los evolucionistas aseguraban que la edad de la Tierra se medía en miles de millones, y no en millones de años. La evolución darwiniana sólo podía tener lugar con el paso de largos períodos de tiempo, con la consiguiente acumulación de cambios genéticos y la producción final de la gran variedad de formas vivas que se han ido desarrollando. Cuando Kelvin, utilizando sus cálculos de las fuentes de energía del Sol, dijo: «Os daré cien millones de años, y no más», parecía que estuviese tramándose un gran conflicto.

Resultó al final que no había conflicto entre la edad del Sol deducida por consideraciones energéticas y la edad de la Tierra obtenida por geólogos y biólogos. Kelvin había caído simplemente en la vieja trampa de suponer que las fuentes de energía que él conocía eran las únicas posibles, o sea que no podían añadirse más «cubos» a nuestro cuadro energético. En realidad la promulgación de la teoría de la relatividad por Albert Einstein a principios del siglo XX supuso una adición muy importante al esquema clasificador de energías que hemos elaborado. La famosa ecuación $E = me^2$ es una parte tan esencial de nuestro folklore que apenas precisa introducción. Nos dice que además de la energía asociada con el movimiento hay una energía asociada con la masa. Si en la naturaleza hay un proceso tal que la masa del sistema sea al final menor que al principio, este proceso produce energía. Esto es exactamente análogo a la combustión, en la que la diferencia de energía eléctrica antes y después de la oxidación aparece en forma de calor.

Por lo tanto, la masa se convierte en un cubo más para la energía. Digamos de paso que siendo el factor c^2 (el cuadrado de la velocidad de la luz) que aparece en la fórmula de Einstein tan grande, basta solamente convertir una pequeña cantidad de masa para llenar un cubo de energía muy grande. De hecho si pudiese convertirse completamente en energía un bloque de cemento del tamaño aproximado de la silla donde estamos sentados suministraría toda la energía utilizada durante un año en Estados Unidos para cualquier uso.

La energía del cubo de la masa mantiene brillando al Sol. La figura 3 es un diagrama esquemático y simplificado del proceso. Cuatro protones (los núcleos de cuatro átomos de hidrógeno) se unen para formar un único

núcleo de helio, más unas cuantas partículas ligeras más (no debemos preocupamos ahora de la naturaleza exacta de estas otras partículas). Decimos que el hidrógeno se convierte en helio mediante la *fusión* nuclear.

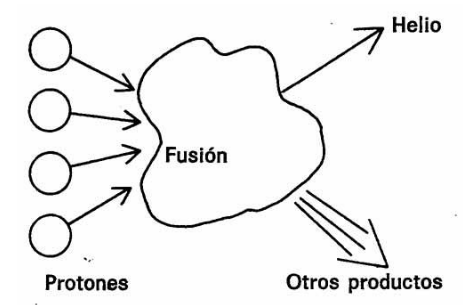


Fig. 3

Podemos aplicar ahora al proceso de fusión el mismo tipo de análisis que efectuamos con la combustión: sumar las energías antes y después, y ver si hay un déficit. En este caso el déficit es bastante notable porque la masa del núcleo final de helio, sumado a las masas de los otros productos varios, es inferior a la masa de los cuatro protones originales. Esta diferencia, de acuerdo con la fórmula de Einstein, se convierte en energía en sus formas más convencionales (principalmente energía cinética de las partículas). Es la energía que al final vemos en forma de luz solar.

En cierto modo, el hecho de que el Sol continúe saliendo y brillando cada día después de miles de millones de años es una confirmación de la teoría de Einstein. El Sol convierte unos 600 *millones* de toneladas de hidrógeno en helio cada segundo, pero es tan enorme que pasarán muchos miles de millones de años antes de que se agote su reserva de combustible nuclear. Por lo tanto, Kelvin tenía razón al decir que el Sol acabaría consumiendo todo su combustible y que este proceso estaría gobernado por la Primera Ley. Pero Kelvin no se daba cuenta de que había una fuente de energía infinitamente más poderosa que esperaba ser descubierta algún día.

Conocemos, pues, de momento tres tipos de energía: la de masa, la cinética y la potencial, con varias subclases de esta última. En realidad los físicos ignoran a menudo las distinciones que hemos explicado y hablan simplemente de la masa-energía como si fuera una entidad indivisible.

Como es lógico, saber si esto representa un juicio definitivo sobre el tema es un tema abierto a la especulación. La experiencia del siglo pasado no parece apoyar mucho a quienes afirman que ya lo sabemos todo sobre la energía. Pero aunque se descubran nuevos cubos de energía parece seguro que en el futuro la Primera Ley y la constancia que impone dentro de la naturaleza sobrevivirán.

II. TODO DEPENDE DE NUESTRO PUNTO DE VISTA

La historia de la ciencia ofrece muchos ejemplos de evoluciones que cambiaron nuestro concepto del lugar que el hombre ocupa en el Universo. La opinión aceptada hasta fines de la Edad Media era que la Tierra estaba situada en el centro de todo y que cada uno de los cuerpos celestes (incluyendo el Sol) giraba a su alrededor. Después de Copérnico aceptamos la idea de que la Tierra no era más que uno de los varios planetas que giran alrededor del Sol. Más tarde se descubrió que el mismo Sol no era más que una de las muchas estrellas que pueblan la galaxia Vía Láctea. Actualmente sabemos que los 10.000 millones de estrellas en nuestra galaxia sólo forman uno de los conjuntos existentes y que hay más de 1.000 millones de galaxias en el Universo observable.

De todos los descubrimientos citados en el párrafo anterior, el que tiene un efecto más inmediato sobre nosotros es el primero. El hecho de que estemos situados sobre un globo que gira significa que todos los objetos de la Tierna se comportan de modo algo distinto a lo esperado.

El primer científico moderno que pensó en las causas de estas diferencias fue Gaspard Gustave de Coriolis. Coriolis recibió una formación de ingeniero en París a principios del siglo XIX y pasó buena parte de su vida enseñando en la École Polytechnique, la más selecta escuela técnica de Francia. (Allí se le recuerda como el hombre que ordenó la instalación en las aulas de aparatos para refrescar el agua, aparatos que los estudiantes todavía llaman Corios.) Coriolis se interesó por el diseño de máquinas, y en especial quiso calcular la tensión que tiene que resistir el armazón de una máquina debido al movimiento de sus partes. Esto le condujo de modo natural a considerar los efectos de estructuras en movimiento sobre el movimiento de los fluidos. En 1835 publicó un artículo donde demostraba que, debido a la rotación de la Tierra, el movimiento de los fluidos en su superficie sufría una deformación. Los fluidos en vez de desplazarse en línea recta se desvían y recorren trayectorias en remolino como las que vemos a menudo en las fotografías desde satélite representando tormentas.

De entrada este resultado es muy sorprendente. En 1687 Isaac Newton había enunciado la Primera Ley del Movimiento, que más tarde acabaría por ser considerada como uno de los principios directores del mundo físico. Esta ley afirma que todo objeto conserva su estado de movimiento uniforme si no actúa sobre él ninguna fuerza. Por ejemplo, una partícula que se mueva en línea recta ha de continuar moviéndose en línea recta si no interviene ningún factor exterior que la obligue a desviarse. Inversamente, si observamos que una partícula se desvía del movimiento rectilíneo, la Primera Ley nos dice que ha debido de actuar alguna fuerza sobre ella. Pero si la «partícula» en cuestión es una molécula de aire dentro de un huracán sabemos que se desplazará según una trayectoria curva, a pesar de que no parece que haya ninguna fuerza presente que pueda obligarle a hacerlo.

Podemos comprender la solución de este dilema aparente imaginando una situación sencilla. Supongamos que alguien está en el Polo Norte y que tira una pelota a una persona situada en el ecuador. Si la Tierra no girara, la pelota seguiría una línea recta entre los dos jugadores, como muestra la figura 4A. La trayectoria de la pelota sería la misma tanto si la observáramos desde, el suelo como desde una nave espacial aparcada encima de la Tierra. En ambos casos veríamos que la pelota sigue una línea recta.

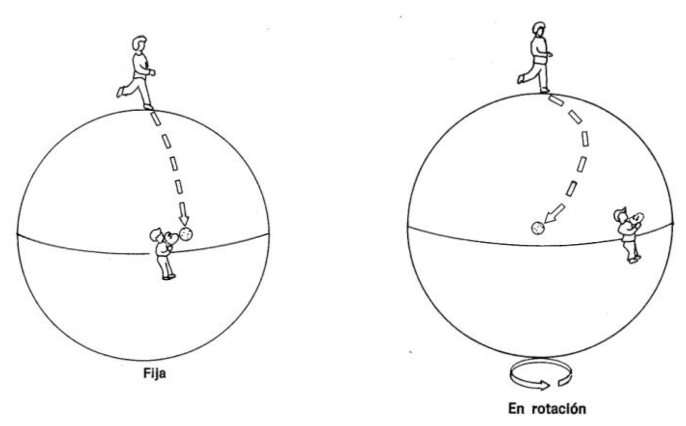


Fig. 4A Fig. 4B

Sabemos, sin embargo, que la Tierra gira sobre sí misma. En el mundo real, un observador en una nave espacial vería desarrollarse una secuencia como la de la figura 4B. Una vez tirada la pelota, se desplazaría siguiendo una línea recta newtoniana, porque no le afectaría ninguna fuerza. Sin embargo, durante el vuelo de la pelota, la persona situada en el ecuador se desplazaría siguiendo el movimiento de la Tierra, y el efecto total sería que la pelota caería a sus espaldas. Esta situación es perfectamente comprensible, pero la persona situada en el ecuador tendría una sensación algo extraña. Vería que la pelota se dirige hacia él desde el polo, pero que a medida que avanza empieza a desviarse hacia la izquierda tocando finalmente tierra en el punto indicado.

La persona que está en el ecuador no se ha movido, puesto que tiene los pies plantados firmemente en el suelo. Desde su punto de vista la desviación de la pelota en el aire sólo puede explicarse por la presencia de una fuerza. Tenemos, por lo tanto, dos descripciones diferentes del mismo hecho. El observador en la nave espacial no ve que actúe ninguna fuerza sobre la pelota, pero quien espera la pelota en el ecuador sí la ve.

¿Quién de los dos tiene razón?

Si lo pensamos un momento comprenderemos que ambos tienen razón en el sentido de que cada cual proporciona una descripción perfectamente precisa de lo que ve. Sólo difieren en la interpretación de los hechos. El observador de la nave espacial ve una partícula que se mueve en línea recta sin que le afecte ninguna fuerza, mientras que la persona en el ecuador ve una partícula desviada por la presencia de una fuerza. En otras palabras, un observador situado en un marco de referencia en rotación (como la Tierra) ve que actúa una fuerza, mientras que un observador situado fuera del marco no la ve. Los físicos suelen llamar fuerzas aparentes o ficticias a estas fuerzas cuya existencia depende del punto de vista del observador. La fuerza que provoca la desviación de la pelota en movimiento se llama fuerza de Coriolis, porque Coriolis fue el primero en explicarla.

Observemos también en la figura 4B que cuando la persona situada en el ecuador ve desviarse la pelota hacia su izquierda, ve que se desplaza en una trayectoria curva con la dirección general de las agujas del reloj. Si quien tira la pelota se hubiese situado en el Polo Sur, la situación se habría invertido (v. fig. 5). El del ecuador habría visto desviarse la pelota hacia su derecha y hubiese dicho que esta dirección era contraria a la de las agujas

del reloj. Por lo tanto, la rotación de la Tierra es la causante última de los remolinos que vemos en las fotos de satélite. El viento se desplaza en línea recta mientras la Tierra gira debajo suyo, y un observador sobre la Tierra ve desplazarse al viento en una trayectoria curva, igual a la de la pelota vista en nuestro ejemplo por la persona situada en el ecuador.

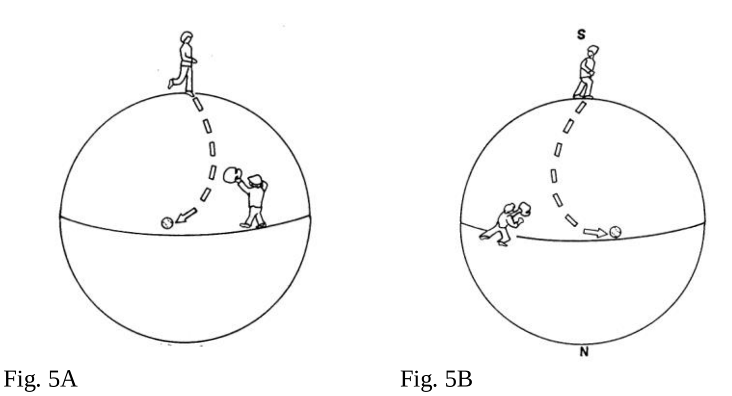


Fig. 5A Fig. 5B

Esta explicación de la fuerza ficticia relacionada con un marco de referencia rotatorio es un elemento muy convencional en física y puede aplicarse a varios problemas. Las formas de las corrientes en los océanos terrestres y de los vientos dominantes están determinadas por la fuerza de Coriolis. Recuerdo, a un nivel más familiar un debate prolongado entre mis compañeros doctorados de Stanford sobre si los wáteres descargaban diferentemente en el hemisferio norte y en el hemisferio sur debido a los efectos de Coriolis. ¡Realmente la física afecta cualquier detalle de la vida!

Podemos considerar todo este argumento desde otra perspectiva. Supongamos que por pura perversión insistiéramos en tomar al pie de la letra la Primera Ley de Newton, y que definiéramos una «línea recta» como la trayectoria seguida por un objeto sobre el cual no actúa ninguna fuerza. Si lo hiciéramos nos veríamos obligados a afirmar que quien dibujó los meridianos de longitud sobre la Tierra no tenía ni idea del problema, porque de hecho una pelota lanzada desde el Polo Norte, como ya hemos visto, no se desplazará siguiendo estas marcas. Un meridiano y una «línea recta» sólo

coincidirían utilizando esta definición si la Tierra no girara. Podemos utilizar una expresión familiar de los aficionados a la ciencia ficción y decir que la rotación de la Tierra «deforma el espacio» sobre la superficie terrestre, cambiando el mapa representado en la figura 6A y convirtiéndolo en el de la figura 6B.

En definitiva este nuevo enfoque nos obliga a comparar dos definiciones diferentes del término lógico *línea recta.* Una de ellas, ilustrada por el meridiano de longitud, es de naturaleza geométrica. Trazamos la línea bajando una perpendicular desde el polo al ecuador. La otra es dinámica. Determinamos su situación observando el movimiento de un objeto en caída libre. Nuestro concepto habitual de la línea recta está tan centrado en la Tierra que casi siempre consideraremos el punto de vista dinámico como un simple ejercicio académico de dudosa utilidad, pero hay muchos casos (como pronto veremos) en los que esta seguridad intuitiva nos abandona.

Si tomamos en serio el punto de vista dinámico, este ejemplo nos demuestra que existe una relación íntima entre el punto de vista del observador, la cuestión de saber si actúa o no una fuerza, y el sistema de coordenadas que nos parece razonable.

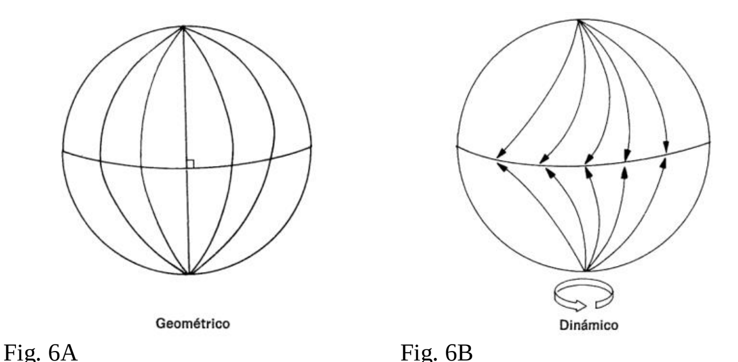


Fig. 6A Fig. 6B

Albert Einstein fue el primer científico moderno que vio todas las implicaciones de este punto de vista. Si algo tan ordinario como la fuerza de Coriolis depende del punto de vista desde el cual observamos los hechos,

¿qué puede decimos sobre otros fenómenos que damos sin más por sentados? ¿Qué puede decimos de la gravedad? ¿Es una fuerza auténtica, o también depende del punto de vista del observador?

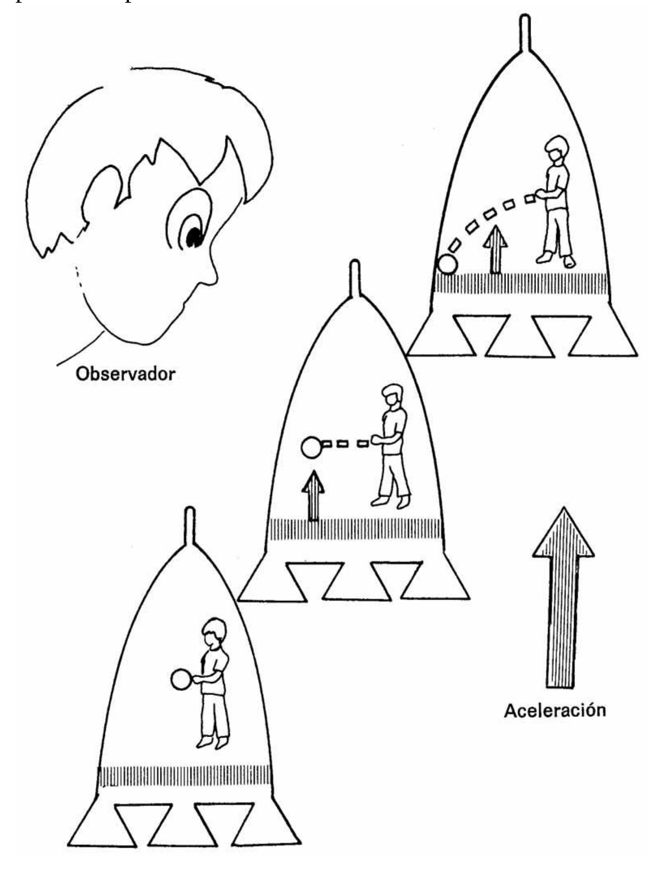


Fig. 7

Una manera de contestar esta pregunta es preguntarse si hay alguna experiencia ordinaria que parezca imitar los efectos de la gravedad, alguna experiencia que nos haga aparentemente más pesados o más ligeros de lo que realmente somos. Quien ha subido alguna vez en un ascensor sabe que

la respuesta es positiva. Cuando el ascensor empieza a acelerarse hacia arriba nos sentimos tirados hacia abajo, más pesados. Cuando decelera, nos sentimos como si flotáramos, más ligeros. Si estuviéramos de pie sobre una balanza, estas sensaciones quedarían registradas, el peso indicado sería más alto cuando el ascensor se pusiera en marcha y más bajo cuando se detuviera. En otras palabras, parece ser que una aceleración o deceleración puede producir efectos exactamente iguales a los que asociamos normalmente con la gravedad. (En física no se suele distinguir entre los términos *aceleración* y *deceleración.* Se define una aceleración como cualquier cambio de velocidad, y según esto una deceleración es simplemente una aceleración negativa. En todo el libro usaremos el término *aceleración* en este sentido general.)

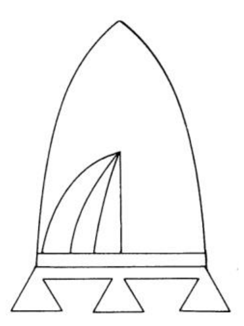


Fig. 8

Podemos dar un paso más en esta analogía entre la fuerza de Coriolis y la gravedad. Cuando estamos en un ascensor que sube sentimos fuerzas que nos empujan contra el suelo y que pesan sobre nosotros. Una persona situada fuera del ascensor no vería estas fuerzas, sólo vería el suelo apretado contra nuestros pies. Por lo tanto, la fuerza de tipo gravitatorio que depende de la aceleración ha de ser otra de las fuerzas ficticias relacionada con el marco de referencia del observador, igual que la fuerza de Coriolis. Y si antes nos basamos en nuestro punto de vista normal centrado en la Tierra y supusimos que un observador situado sobre la superficie de la Tierra tiene la visión «correcta» de lo que sucede, el mismo prejuicio nos hace ahora pensar que el observador situado fuera del ascensor da la descripción correcta de lo que sucede cuando empieza a moverse la aguja de la balanza.

¿Pero qué pasa si nos imaginamos llevando a cabo este experimento en un punto donde no haya de entrada una manera «correcta» de ver las cosas? Imaginemos, por ejemplo, una nave espacial alejada de cualquier estrella o planeta, acelerando con respecto a un observador. Si una persona en la nave tira una pelota lateralmente mientras la nave acelera, el observador en la otra nave verá que el piso de la primera nave se acelera, avanza y choca con la pelota. Sin embargo, para la persona que la tiró, la pelota no ha hecho más que describir un arco y caer al piso. Por lo que a esta persona respecta, la pelota se vio atraída hacia el suelo por una fuerza, y esta fuerza no puede distinguirse por sus efectos de la fuerza de la gravedad que existiría en la superficie de un planeta. No podemos imaginar ningún experimento que permita al viajero afirmar que la «fuerza» que tira de la pelota hacia abajo no es la gravedad sino el resultado de la aceleración de la nave. Si pidiésemos al viajero de la nave espacial que utilizara la definición dinámica de una línea recta antes discutida y le pidiéramos luego que dibujara las líneas rectas a lo largo de las cuales se desplazaría un objeto en movimiento libre, dibujaría un mapa como el de la figura 8.

El punto clave de este ejemplo es que la gravedad producida por cuerpos de gran masa como la Tierra y los efectos de la aceleración no pueden distinguirse unos de otros. Fue precisamente este razonamiento lo que condujo a Einstein a formular en 1915 la teoría general de la relatividad. Se trata esencialmente de una teoría de la gravitación que presenta con un lenguaje matemático preciso la argumentación que hemos ofrecido en los ejemplos anteriores. Ningún observador puede estar seguro de que no está acelerándose; por lo tanto, el principio central de la teoría es que todo observador ha de ver que en el Universo rigen las mismas leyes de la física, tanto si uno está acelerándose como si se encuentra en un campo gravita torio. Para formular este principio con los términos que hemos utilizado antes, no debe importar que un efecto concreto se deba a una fuerza ficticia o a una fuerza real; el resultado ha de ser idéntico. Es pura cuestión de lenguaje que una fuerza sea ficticia o real: en lo que a sus efectos físicos se refiere la cuestión carece totalmente de importancia.

Hemos visto que este principio de relatividad intervenía en nuestro estudio de la fuerza de Coriolis. La persona situada en el ecuador vio actuar una fuerza y el observador de la nave espacial no vio ninguna, pero ambos han estado de acuerdo en que la pelota tenía que caer a la izquierda del

hombre del ecuador. Lo mismo es cierto en relación a la nave espacial acelerada: ambos observadores estarían de acuerdo en que la pelota tenía que acabar cayendo, aunque diferirían al juzgar si actuaba una fuerza o no sobre la pelota. La intuición central de donde partió la revolución relativista iniciada por Einstein con su publicación de 1905 es que las leyes de la naturaleza no dependen del movimiento del observador.

Quizá convenga en este momento hacer una breve digresión sobre el desarrollo histórico de la relatividad. De hecho Einstein propuso dos teorías de la relatividad distintas (pero relacionadas). La que estamos discutiendo aquí es la llamada teoría general, basada en el principio de que dos observadores *cualesquiera* verán actuar en sus marcos de referencia las mismas leyes de la física, tanto si están acelerándose uno con respecto al otro como si no. Como veremos esta teoría es la base de nuestra moderna comprensión de la gravitación. En 1905 Einstein publicó una teoría especial de la relatividad menos general. La teoría especial se basa en la idea de que dos observadores que se desplazan uno en relación al otro con velocidad constante (es decir, sin acelerarse) descubrirán las mismas leyes de la naturaleza. La teoría especial tiene muchas aplicaciones importantes, pero no sirve para la gravitación ni para el efecto de Coriolis. Es un caso especial de la teoría general, el caso de aceleración nula.

Preguntémonos ahora cómo nos condujo a una teoría de la gravedad nuestro pequeño ejercicio mental. La mejor manera de establecer la analogía es utilizar la definición dinámica de una línea recta y la idea de un espacio «deformado». Vimos que la aceleración de la nave espacial produjo una deformación del espacio visto por alguien de dentro de la nave. Si la aceleración y la gravedad son realmente equivalentes, ha de cumplirse que un conjunto de masas producirá exactamente el mismo tipo de deformación que una aceleración. Por lo tanto, una persona situada sobre la Tierra tendría que ver la misma deformación del espacio que una situada en una nave espacial en aceleración. En resumen, ambas personas tendrían que ver algo igual a lo de la figura 9.

Si la persona situada sobre la Tierra tirara una serie de proyectiles a un lado, éstos seguirían exactamente las mismas trayectorias que en la nave espacial acelerada. A esto nos referíamos cuando dijimos que es imposible que un observador mediante un experimento gravitatorio pueda distinguir que está en la Tierra o que está acelerándose en una nave espacial.

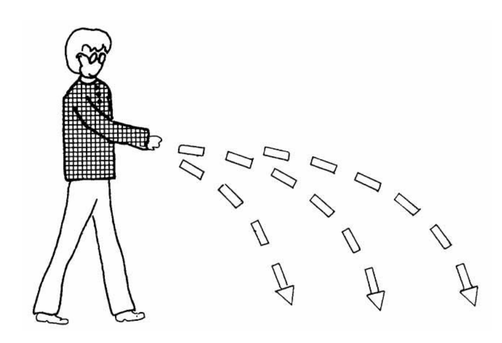


Fig. 9

Podemos seguir esta idea y dar un paso más. Hasta ahora sólo nos hemos ocupado de efectos de gravedad en pequeña escala, como los que provoca sobre los cuerpos que caen. ¿Qué podemos decir de los efectos a gran escala, como los relativos a las órbitas de los planetas? Podemos recurrir a un ejercicio mental para demostrar la relación entre fenómenos a pequeña y a gran escala. Imaginemos al observador de la figura 9 tirando pelotas. Cada una seguirá la habitual trayectoria parabólica, como muestra la figura 10, y si la tira más fuerte más lejos llegará. Podemos suponer que si tirara la pelota con la velocidad justa podría dar toda la vuelta al mundo, como muestra el dibujo. Esta pelota quedaría entonces en órbita y sería un satélite de a Tierra, una pequeña luna. Siguiendo un razonamiento de este tipo Newton acabó proponiendo que la gravedad era la causa de las órbitas de los planetas.

De acuerdo con esta concepción, el movimiento que normalmente relacionamos con la fuerza de la gravedad no se debe en absoluto a una fuerza, sino que es simplemente el resultado del movimiento de diversos objetos a lo largo de líneas «rectas». La única diferencia con nuestras concepciones normales es que las citadas «líneas rectas» no son rectas en el sentido geométrico, sino que están deformadas por la presencia de materia. Este punto de vista tiene una ventaja importante en relación al enfoque convencional. No hay fuerzas ficticias porque no hay ningún tipo de fuerzas. Todo lo que vemos es simplemente un resultado de los efectos de la materia sobre la geometría.

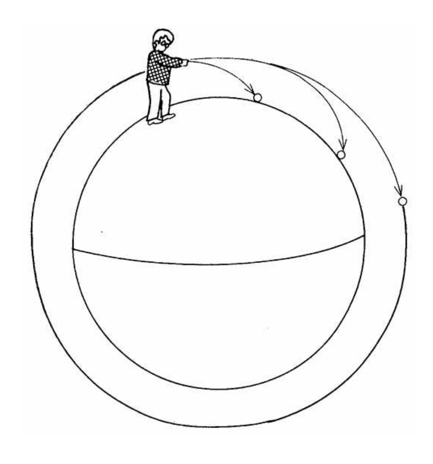


Fig. 10

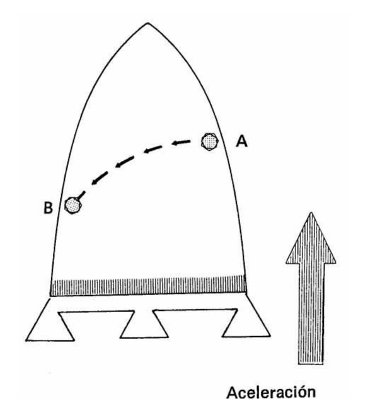


Fig. 11

Quizá nos parezca en este momento que lo único que hemos hecho ha sido adoptar una interpretación bastante artificial de los efectos del movimiento sobre fenómenos observados e inventar una manera algo abstracta de observar el mundo. Resulta, sin embargo, que hay unas cuantas situaciones en las que el punto de vista relativista predice resultados diferentes de los convencionales, y esto nos permite decidir qué punto de vista es el correcto, si antes llevamos a cabo un experimento.

Una de estas situaciones experimentales es fácil de visualizar utilizando el ejemplo de la nave espacial en aceleración (v. fig. 11). Supongamos que la persona del interior de la nave decide proyectar un rayo de luz a través de la nave desde el punto marcado A en una de las paredes. Mientras la luz atraviesa la nave, la aceleración moverá la pared opuesta hacia arriba de modo que la luz llegará al punto B, debajo del nivel de A. La persona de dentro de a nave pensará que la luz ha «caído» durante su trayecto, como hubiese hecho una pelota en presencia de una fuerza gravitatoria. La magnitud de este descenso de la luz será, como es lógico, muy pequeña, porque la luz atraviesa la nave espacial en un tiempo muy breve. Sin embargo, el efecto podría medirse con detectores precisos. Si queremos tomamos en serio nuestra analogía entre aceleración y gravedad debemos llegar a la conclusión de que la relatividad predice que la luz cae o se desvía cuando pasa cerca de un objeto de gran masa como la Tierra o el Sol.

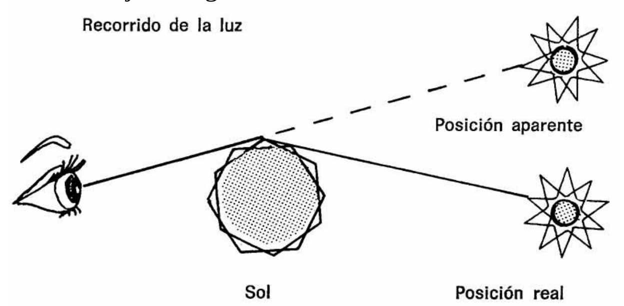


Fig. 12

De hecho la comunidad científica aceptó rápidamente la teoría de la relatividad de Einstein porque en 1919 Arthur (más tarde Sir Arthur) Eddington confirmó esta predicción. Tomó fotografías de un campo estelar antes y durante un eclipse de Sol y midió la desviación aparente de unas cuantas estrellas (v. fig. 12). Hubo que esperar un eclipse para que las estrellas situadas al lado del Sol fueran visibles y no se perdieran en el normal brillo solar. Cuando la desviación medida resultó coincidir con la predicha por Einstein (y diferente de la predicha por la teoría ordinaria) el enfoque geométrico que hemos expuesto se transformó de una abstracción acadé-

mica en uno de los principios centrales de la ciencia moderna. En los sesenta y seis años transcurridos desde aquel acontecimiento histórico, la relatividad general ha superado todas las pruebas experimentales a las que se la ha sometido. Hay, por lo tanto, suficientes motivos para tomársela muy en serio y considerarla una explicación de la naturaleza profunda de la gravitación.

Esta teoría es una manera revolucionaria de concebir el mundo. La idea central es que no hay una manera «correcta» de describir un conjunto cualquiera de fenómenos: todas las descripciones son relativas. Observadores diferentes pueden dar descripciones muy diferentes de lo que ven, pero todos han de concordar en el resultado final de los hechos y en las leyes básicas de la naturaleza que conducen a estos resultados. O sea, que el criterio de verdad en física deja de basarse en lo que es razonable desde el punto de vista de un hipotético observador con «ojos de Dios» y se pregunta si todos los observadores están de acuerdo o no en relación a una ley concreta, con independencia de sus estados relativos de movimiento. Esto supone un gran cambio en relación al espacio y tiempo absolutos imaginados por los seguidores de Newton en los siglos XVIII y XIX.

También se distingue de la física clásica por el grado de importancia que concede a la geometría. En la concepción convencional del Universo, la geometría se limita a proporcionar un marco útil donde encajar los acontecimientos dinámicos, en cambio en esta concepción relativista la misma geometría se ve alterada por la presencia de la materia y a su vez determina el comportamiento de esta materia. La geometría se convirtió con Einstein en un socio con plenos derechos del mundo físico.

Esto puede resultar muy importante si llegan a fructificar las nuevas ideas sobre las teorías del campo unificado (v. cap. 12). Según estas teorías todas las fuerzas de la naturaleza, la fuerza fuerte (que mantiene unidos los átomos), la electricidad y el magnetismo, la fuerza débil (que rige la desintegración radiactiva) y la gravedad, son en realidad aspectos diferentes de una única interacción unificada. Podemos especular diciendo que si esto es cierto y que si como hemos visto la gravedad no es realmente una fuerza sino una manifestación de la interacción entre la materia y la geometría, *todas* las fuerzas de la naturaleza pueden en último extremo ser lo mismo. Dicho con otras palabras, quizá no exista ninguna fuerza, sino únicamente

deformaciones del espacio debidas a la presencia de tipos diferentes de materia.

Sería una conclusión interesante desde un punto de vista filosófico, pero si realmente la relatividad resultara ser el paradigma de la teoría definitiva de la materia, habría que señalar otro hecho todavía más interesante. Todos los grandes monumentos de la física clásica, las leyes de la mecánica, de la electricidad y el magnetismo y de la termodinámica, son esencialmente resúmenes de resultados experimentales. El procedimiento general consistía en reunir un gran número de hechos e integrarlos todos en una teoría coherente. En cambio, con la relatividad general este proceso se invirtió. Einstein llegó a la teoría sin referirse a ningún experimento, exponiendo únicamente una versión más compleja de los experimentos mentales que hemos citado en este capítulo. Fue realmente un ejemplo de primero la teoría y luego los experimentos.

Si la teoría definitiva de la materia se crea algún día de este modo, habremos llegado en cierto sentido al punto de partida. El ideal platónico del conocimiento adquirido a través de la pura razón, tan denigrado por sus supuestos efectos perjudiciales sobre la ciencia, puede llevamos más cerca de la verdad de lo que habíamos imaginado.

III. EL UNIVERSO BIEN EQUILIBRADO

Hace muchos años, cuando yo estudiaba en Oxford, vivía en una casa muy peculiar. El casero aseguraba que por ser la casa del siglo XVII varias ordenanzas le impedían efectuar reparaciones de ningún tipo. Nunca pude saber si aquello era verdad o una simple excusa, pero desde luego el caserón se combaba de modo pintoresco. La situación quedó ilustrada muy vivamente cuando una noche un invitado soltó una pelota de squash. La pelota fue rodando erráticamente sobre las ondulaciones del piso de tablas y finalmente se detuvo precariamente equilibrada sobre una de las elevaciones más altas. A partir de aquel momento tirar una pelota para que recorriera las montañas rusas del pavimento se convirtió en un sistema favorito de aliviar las interminables sesiones de aburrimiento que son parte integrante de la vida estudiantil. Algunos colegas llegaron a dominar la técnica de situar la pelota en una determinada hondonada o elevación del piso, y aquella primavera todos acabamos conociendo bastante bien la topografía del suelo. Sin embargo, no nos dimos cuenta de que el pasatiempo que inventamos era una excelente demostración de uno de los procesos más importantes de la naturaleza: el proceso a través del cual los sistemas llegan al equilibrio y se mantienen en él.

Una de las cosas más asombrosas de nuestro Universo es que desde hace tanto tiempo haya existido más o menos en su forma actual. La Tierra, por ejemplo, ha mantenido su actual distancia al Sol durante más de 4.000 millones de años, lo cual ha tenido una importancia crucial en el desarrollo de la vida. El Sol, por su parte, es un magnífico ejemplo de estabilidad. Ha estado emitiendo energía más o menos a su ritmo actual desde su nacimiento hace 5.000 millones de años, y podemos esperar que continúe haciéndolo hasta su muerte cuando hayan transcurrido 5.000 millones de años más.

Por otra parte, los sistemas inestables también forman parte de nuestra vida cotidiana. Los cambios repentinos del tiempo demuestran la inestabilidad básica de la atmósfera terrestre. Mientras escribo esto tengo muy pre-

sente esta inestabilidad particular, porque delante de mi ventana están cayendo, inesperadamente, varios centímetros de nieve. Otros ejemplos de inestabilidad son algunos desastres naturales como las avalanchas y las inundaciones (en la perspectiva terrestre) y las supernovas (a escala astronómica). Lo sorprendente es que todos estos sistemas, estables e inestables, pueden comprenderse por analogía con la pelota que rodaba por el suelo de aquel viejo caserón. Cuando la pelota se detiene, puede hacerlo en alguna de las tres situaciones de la figura 13. En cada caso decimos que la pelota está en equilibrio si la fuerza de la gravedad sobre la pelota, dirigida hacia abajo, está exactamente equilibrada por la fuerza ejercida por el suelo, dirigida hacia arriba. Sin embargo, podemos ver fácilmente que los tres actos equilibrantes son fundamentalmente diferentes. Para poder descubrir esta diferencia esencial tenemos que pensar en lo que sucede cuando desplazamos la pelota a una pequeña distancia de su posición de equilibrio.

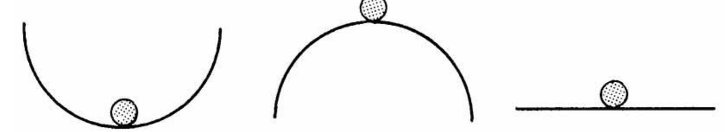


Fig. 13

Si la pelota está abrigada en el fondo de un valle, como vemos a la izquierda, darle un empujón apenas supondrá nada. Tan pronto como empiece a rodar por las laderas del valle, se irá frenando, se detendrá y rodará bajando de nuevo a su posición original. Los sistemas como éste, en los que las pequeñas perturbaciones no provocan grandes cambios, se dice que están en equilibrio estable.

En cambio, la situación es muy distinta si la pelota acaba deteniéndose en lo alto de una elevación, como vemos en el dibujo del centro. En este caso si damos a la pelota un pequeño empujón empezará a rodar ladera abajo y una vez puesta en movimiento la pelota ya no volverá más a su posición inicial. Tenemos aquí un ejemplo de equilibrio inestable, en el que una pequeña perturbación provoca un gran cambio en el sistema.

La situación representada en la derecha muestra el estado intermedio entre la estabilidad y la inestabilidad. En este caso de equilibrio neutral o

indiferente, un pequeño empujón provoca pequeños cambios de posición y la pelota ni vuelve a su posición inicial ni huye aceleradamente.

Una manera fructífera de analizar esta situación es hacerlo en función de la energía. Quien haya probado alguna vez subir un piano por un tramo de una escalera sabe que se necesita mucha energía para subir algo y bastante menos para bajarlo. Por lo tanto, cuando el piano está arriba su estado es de mucha mayor energía potencial que cuando está abajo. De un modo exactamente análogo, cuando la pelota está en lo alto de la elevación su estado posee una energía superior a la que tiene cuando la pelota está en algún punto de la ladera. E inversamente, cuando la pelota está en el fondo de un valle su estado tiene una energía inferior a la que tiene cuando la pelota está en algún punto de la ladera. Decimos en este «lenguaje de energía» que un equilibrio será estable si para desplazar este sistema a una pequeña distancia fuera del equilibrio se precisa aumentar la energía del sistema, mientras que será inestable si al hacerlo disminuye la energía del sistema.

Este análisis de la estabilidad explica que los sistemas inestables en la naturaleza no duren mucho tiempo. Hemos hablado de un modo bastante general sobre la posibilidad de desplazar los sistemas fuera de su posición de equilibrio; se podía suponer con ello que las pequeñas perturbaciones necesarias para salir del equilibrio se provocaban deliberadamente. Sin embargo, si pensamos un poco sobre la pelota puesta en equilibrio sobre una eminencia, comprenderemos que puede caer sin que nadie haga nada deliberado. Un golpe de viento, un portazo o incluso el paso de alguna persona por el vestíbulo podrían tener el mismo efecto. Sabemos que a nivel microscópico los átomos que constituyen la pelota y la eminencia del suelo están sufriendo continuamente movimientos aleatorios, o sea que la pelota está bailando continuamente. En otras palabras, *todo* sistema en la naturaleza está sometido continuamente a perturbaciones de un tipo u otro. Si un sistema como la pelota está en equilibrio inestable, más tarde o más temprano las perturbaciones, aunque sean microscópicas, crecerán hasta el punto de hacer rodar la pelota pendiente abajo. Si la pelota empieza a rodar no se parará hasta que quede abrigada y segura en algún valle donde su energía sea muy inferior a la que tenía inicialmente.

Estos dos hechos —los sistemas que pueden desplazarse a estados de menor energía son inestables, y tales sistemas están sometidos continuamente a pequeñas perturbaciones— nos permiten formular una conclusión general muy importante:

Todo sistema en la naturaleza evolucionará hacia el estado de menor energía posible.

Esta conclusión es casi trivial si se aplica al problema de la pelota rodando por un suelo desigual, pero es igualmente válida para cualquier otro sistema del Universo. En el ejemplo de la pelota sobre el suelo, la energía de la pelota es del tipo que hemos llamado energía potencial gravitatoria (v. cap. 1). Las eminencias y valles en el suelo corresponden directamente a máximos y mínimos en la energía gravitatoria de la pelota. Sabemos, sin embargo, que hay muchas formas de energía no gravitatorias. Un electrón libre en un metal podría tener una energía parecida a la de la figura 14, en la que los «valles» corresponden a lugares donde se reúnen iones positivos. Si un electrón se desplaza del punto A al punto B no se desplaza realmente pendiente abajo. El electrón al pasar de A a B se desplaza horizontalmente hacia una región de menor energía; «rueda pendiente abajo» sólo en sentido figurado. Los huecos son fluctuaciones de energía y no corresponden a ningún movimiento hacia arriba o hacia abajo del electrón. Pero para un físico no hay diferencia esencial entre la forma del suelo de una habitación y la forma de la curva dibujada en la figura 14. El físico llama a ambas superficies potenciales, y el principio de la mínima energía obliga al sistema a acabar situado en un «valle», tanto si el valle está situado literalmente debajo de la eminencia como si no. Lo único necesario es que el valle esté a una energía inferior que la eminencia.

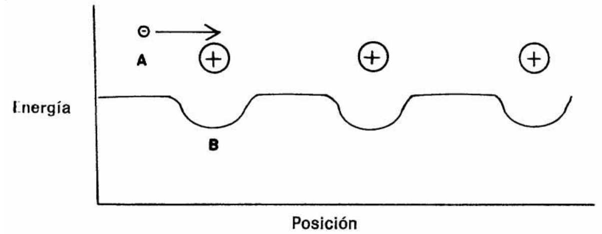


Fig. 14

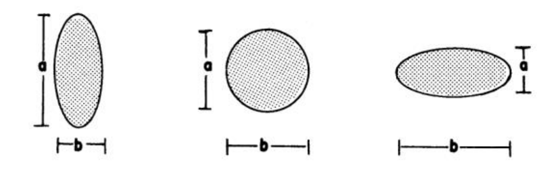


Fig. 15

Para que quede clara la naturaleza de este principio, consideremos un tercer ejemplo. Una gota de agua al caer por el espacio podría en principio adoptar una forma cualquiera. La figura 15 presenta tres formas posibles, desde un «cigarro» hasta una «tortita» pasando por una esfera como configuración intermedia. El cociente de los dos ejes designados *a* y *b* mide el grado de desviación de la gota en relación a una esfera perfecta. Si a/b es mayor que 1, la gota tiene forma de cigarro; si es menor que 1 la gota tiene forma de tortita; si a/b es exactamente igual a 1 (es decir, si los dos ejes son iguales) tenemos una esfera. Si representamos la energía almacenada en la gota en función de a/b, obtenemos una superficie potencial como la de la figura 16.

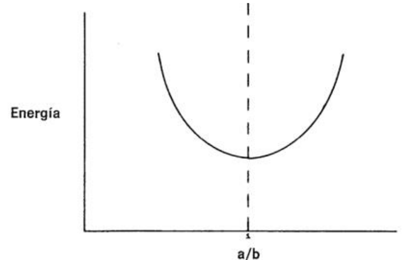


Fig. 16

El «valle» se da cuando a/b = 1, de lo cual deducimos que una gota cayendo en el vacío acabará formando una esfera perfecta. Esto se debe a que la esfera es la figura geométrica con la menor área para una masa determinada de agua y, por lo tanto, es la forma en la que se ha de gastar la menor cantidad de energía para crear una superficie. Un resultado práctico de este razonamiento es un programa de la NASA para investigar la posi-

bilidad de fabricar bolas de rodamiento perfectamente esféricas en el espacio, donde las gotas de metal fundido pueden dejarse en caída libre sin sufrir las influencias de la gravedad ni de la resistencia del aire.

De un modo más general, la importancia de este ejemplo reside en que la «perturbación» no tiene que referirse necesariamente a un movimiento en el espacio del mismo modo que «eminencias y valles» tampoco tienen que tomarse en sentido literal al aplicar el principio de la energía. Cuando presentamos el ejemplo de la pelota rodando por el suelo, hablamos de las perturbaciones como de pequeños desplazamientos de posición de la pelota en una eminencia o en un valle, pero no tenemos que limitamos a esta definición. Con una gota de agua, la perturbación se refiere a la deformación de la superficie, no a la posición de la gota. Se trata de un tipo de perturbación generalizada, definida en función de las desviaciones con respecto a la situación de equilibrio. Es evidente que hay que dar la definición que se adapte al problema concreto estudiado. Sin embargo, al igual que con la pelota en el suelo, todos los sistemas están sujetos a perturbaciones minúsculas y generalizadas: el principio de la energía mínima siempre actúa.

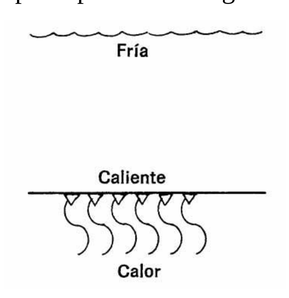


Fig. 17

La naturaleza nos ofrece tantos ejemplos de este principio que resulta difícil escoger unos cuantos para un examen más detenido. He escogido los dos que voy a discutir porque ilustran la diversidad de fenómenos sometidos al principio anterior.

Consideremos una capa de fluido, por ejemplo agua, calentada desde abajo en una cazuela destapada. Al cabo de un rato podremos esperar que la situación sea la de la figura 17: la capa de agua situada cerca del fondo

se habrá calentado, y a medida que ascendamos por el líquido la temperatura disminuirá, quedando la capa más fría en lo alto. Puesto que el agua disminuye de densidad cuando se calienta, un volumen dado de agua en el fondo de la cazuela pesará menos que el mismo volumen de agua cerca de la superficie libre.

La situación que acabamos de describir está en equilibrio, pero se ve fácilmente que ha de ser inestable. La energía total del sistema podría disminuirse intercambiando volúmenes iguales de agua caliente y de agua fría, como muestra la figura 18. Por lo tanto, suponemos que el sistema «rodará pendiente abajo» desde la situación descrita en la figura 17, donde el agua es estacionaria, y pasará a la situación de la figura 18, donde hay una transferencia constante de agua caliente desde el fondo hacia arriba, acompañada por la correspondiente transferencia de agua fría desde arriba hasta el fondo.

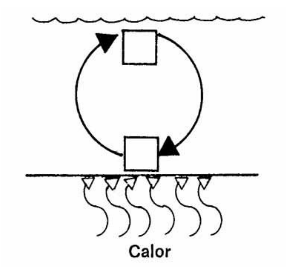


Fig. 18

El mecanismo que podría poner en marcha esta transferencia (la perturbación, dicho de otro modo) es fácil de comprender. Imaginemos un pequeño volumen de agua caliente cerca del fondo de la cazuela (v. fig. 19). Supongamos que una de las pequeñas y omnipresentes perturbaciones obligará a este volumen de agua a elevarse ligeramente en la cazuela. El agua caliente en esta nueva posición se verá rodeada de agua más fría y más densa. El pequeño volumen caliente se verá impulsado hacia arriba por las fuerzas normales de flotación como un trozo de madera sumergido en el agua y este movimiento ascendente se producirá antes de que el agua calentada tenga tiempo de enfriarse. En consecuencia, el agua caliente será impulsada más arriba todavía, y se encontrará rodeada por agua todavía

más fría y más densa. Esto a su vez creará una fuerza de flotación mayor y un movimiento adicional ascendente del agua caliente. Está claro que el resultado final de la pequeña perturbación del fondo será enviar el pequeño volumen de agua arriba del todo. Puede utilizarse un argumento análogo para explicar el correspondiente descenso del agua más fría.

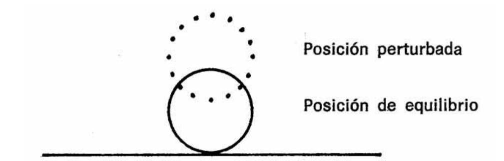


Fig. 19

Una vez realizado este intercambio, el agua caliente que ha subido hasta arriba radiará y se enfriará y el agua fría que ha bajado al fondo se calentará. Podemos esperar que se produzca un movimiento continuo del agua debido a la inestabilidad que hemos descubierto. Esperamos que el movimiento del agua será como el de la figura 20, con el agua caliente subiendo continuamente en un lugar y el agua fría bajando continuamente en otro lugar. Esta configuración particular se llama célula de convección. En este sistema el principio de la energía actúa continuamente, porque cuando una cantidad dada de agua caliente del fondo se ha elevado hasta la superficie empieza inmediatamente a enfriarse, cediendo calor a su entorno más frío y hundiéndose luego hacia el fondo. Normalmente un fluido calentado estará formado por muchas células una al lado de otra constituyendo un todo continuo. La próxima vez que hagamos unos huevos duros vale la pena fijarse en los puntos de la superficie del agua donde se concentra la espuma. Las corrientes arrastran hasta la superficie pequeños restos en los puntos señalados por A en la figura 20. En estos puntos el agua fría desciende y las partículas que llevaba consigo quedan atrapadas allí. Al final se concentran en estos puntos restos suficientes que son visibles al mirar la cazuela.

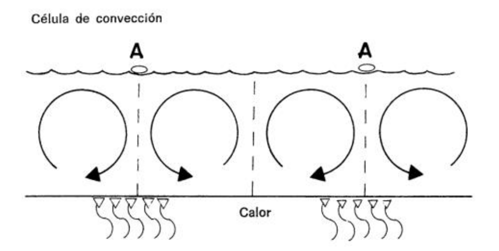


Fig. 20

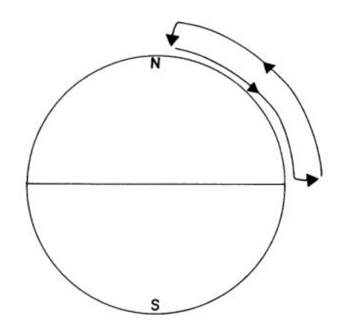


Fig. 21

Las células de convección aparecen siempre que un líquido o un gas se calienta desigualmente. Por ejemplo, la atmósfera de la Tierra se calienta mucho más en el ecuador que en los polos. Si la Tierra no girara sobre sí esperaríamos encontrar una célula de convección del tipo dibujado en la figura 21, que transportaría calor de los trópicos a los polos. Debido a la rotación de la Tierra (y a las fuerzas de Coriolis discutidas en el cap. 2), la situación real no es tan sencilla, pero este flujo general de calor hacia los polos proporciona la energía necesaria para la distribución dominante de vientos en la Tierra y, por lo tanto, es responsable de gran parte de nuestro clima. El mismo efecto, actuando en el agua, impulsa la Corriente del Golfo y las demás grandes corrientes oceánicas.

A una escala más pequeña, el calor almacenado en los ladrillos y el cemento de las grandes ciudades calienta el aire encima del suelo y crea pequeñas células de convección. En este sentido las ciudades crean su propio tiempo atmosférico. Este efecto se ha observado en los grandes centros

comerciales de las afueras, donde los grandes aparcamientos asfaltados sirven de fuentes de calor para las columnas de aire caliente que suben hacia arriba. Se cree que incluso la deriva de los continentes está impulsada por efectos convectivos relacionados con el calor del núcleo de la Tierra.

Estos ejemplos ilustran la belleza intelectual que impregna la física. Ver la unidad esencial entre una cazuela de agua hirviendo y la lenta deriva de los continentes, comprender que a pesar de las diferencias aparentes está actuando alrededor nuestro el mismo mecanismo es la satisfacción última que su formación depara al científico. La sensación estimulante que proporcionan estas visiones dan fuerzas a hombres y mujeres durante los años de estudio y de frustrante investigación que componen la mayor parte de la vida activa del científico medio.

Esta sensación me afectó muy vivamente hace unos años cuando en un artículo del físico norteamericano Frank Wilczek *(Scientific American,* diciembre de 1981) encontré una de las aplicaciones más intrigantes del principio de la energía mínima que haya visto nunca. Esta aplicación se relaciona con una especulación sobre la historia inicial de nuestro Universo. Se acepta hoy, generalmente, que nuestro Universo empezó con una Gran Explosión, en inglés Big Bang, inmediatamente antes de la cual toda la materia estaba comprimida en un único punto increíblemente denso. La expansión empezó hace unos 10.000 o 15.000 millones de años, y todavía hoy sigue su curso, obligando a las galaxias a separarse cada vez más unas de otras. Es posible especular sobre el primer instante del Big Bang y seguir la historia del Universo desde su estado inicial al presente de un modo muy parecido a como seguimos el recorrido de una pelota sobre el piso.

Si nos remontáramos no a los primeros minutos o segundos, sino a los 10^{-25} segundos después del Big Bang (es decir, un cero y una coma decimal seguidos de treinta y seis ceros antes de la primera cifra), la temperatura sería tan elevada que toda la materia se comportaría del mismo modo, con independencia de su carga eléctrica o de su masa, y todas las fuerzas entre las partículas serían las mismas. Un físico diría que esta situación representa un grado elevado de simetría. A medida que fue progresando la expansión del Universo, la bola de fuego producida por la explosión se enfrió y empezaron a tener importancia las distinciones entre partículas y fuerzas. La simetría empezó a desaparecer.

Quizá la mejor analogía de este proceso sería la congelación del agua. El agua en estado líquido es muy simétrica. Si estuviéramos suspendidos en el océano veríamos agua líquida en cualquier dirección. Un físico diría que esto representa un estado de simetría elevado, porque lo que observamos no depende de la dirección en que miremos. Sin embargo, si el agua se congelara, la situación cambiaría. Los cristales de hielo o los copos de nieve tienen forma hexagonal, y por lo tanto el agua helada no tiene el mismo grado de simetría que el agua líquida: observamos cosas diferentes según la dirección en que miremos un bloque de hielo. Normalmente consideramos que un cristal de hielo o un copo de nieve son simétricos, porque si hacemos girar a uno u otro un ángulo de 60 grados, obtenemos una figura que no puede distinguirse de la figura inicial. Pero esta simetría no es tan grande como la del agua líquida, en la que una rotación en *cualquier* ángulo nos presentará el mismo aspecto.

Podemos pensar del mismo modo que el Universo sufrió una serie de «congelaciones» durante las cuales desaparecieron simetrías. Por ejemplo, en una fase del primitivo Universo, la temperatura era tan elevada que la fuerza fuerte (que mantiene cohesionados los núcleos de los átomos), la fuerza débil (que gobierna la desintegración radiactiva) y la fuerza eléctrica eran mutuamente indistinguibles. Esta situación posee un grado elevado de simetría. Sin embargo, la temperatura bajó al expandirse el Universo y sucedió algo parecido a la «congelación». Después de la congelación, la fuerza fuerte ya resultó distinguible de las otras dos. Más tarde, otra «congelación» separó las fuerzas débil y eléctrica, dejándonos con nuestro Universo presente, en el que las tres fuerzas son muy diferentes una de otra, y el nivel de simetría es bajo. Se debate todavía el orden exacto de estas «congelaciones» y el momento en que ocurrieron, pero todas hubieron concluido mucho antes de que el Universo tuviera un segundo de edad.

Cuando el agua se congela, la energía del hielo es inferior a la del agua que le precedió. Lo sabemos porque tenemos que añadir energía en forma de calor a un cubito de hielo para que se funda y vuelva a ser agua. Del mismo modo la energía total del Universo después de cada «congelación» fue inferior a la de antes. En cierto sentido, pues, la evolución inicial del Universo es como la de una pelota rodando pendiente abajo, y constituye un ejemplo más de un sistema que busca su estado de energía mínima. Pero

tampoco esto acaba aquí. Aun suponiendo que pudiéramos seguir la historia del Universo hasta su principio utilizando los mismos razonamientos que hemos aplicado a otros sistemas, tendremos que enfrentamos con un problema mucho más antiguo y profundo: saber cómo era el Universo antes de la Gran Explosión.

Algunos científicos se niegan simplemente a considerar esta cuestión, señalando que en sentido estricto no puede responderse con las técnicas de la ciencia. Otros postulan que la actual expansión del Universo se invertirá algún día, y que la consiguiente contracción producirá de nuevo el estado infinitamente denso que servirá de inicio para un nuevo Big Bang. Según estos científicos el Universo es un ciclo interminable de expansión y de contracción, y carece de sentido preguntarse qué había antes del Universo. Según ellos no hubo nunca un «antes». Ambas posturas son intelectualmente defendibles y las he utilizado a menudo cuando mis estudiantes me han hecho preguntas difíciles. Pero si bien ambas respuestas tienen consistencia lógica, siempre he pensado que eran algo insatisfactorias.

Pero ahora podemos enfocar la cuestión de un modo nuevo. Si pensamos lo que debió de haber existido antes del inicio de nuestro actual Universo, el mejor candidato es la nada: el vacío. Entonces la razón de la existencia del Universo se reduce a saber por qué la materia en su forma actual surgió del vacío primordial. Y ahora comprendemos que esto se reduce a saber si el Universo con materia en su interior tiene un estado de energía inferior al del Universo sin materia. En caso afirmativo, el vacío seria de modo muy real, inestable, y la aparición de la materia, que inició el Big Bang, sería únicamente un ejemplo más de un sistema que busca el estado disponible de menor energía.

Como es lógico hay una gran diferencia entre poder hablar de una idea así y calcular las energías que entran en juego. En el momento actual todo se reduce a una simple idea que está por desarrollar. Sin embargo, es una indicación de la unidad del conocimiento científico el hecho de que el mismo principio que gobierna a una pelota rodando por un piso pueda explicar también la existencia de la pelota, del piso y de toda la materia del Universo.

IV. LA MANCHA DE PETRÓLEO Y EL ELECTRÓN

Cuando entramos en una gasolinera una tarde cálida de verano, observamos que las abundantes manchas de petróleo en el firme parecen rielar a la luz del sol, brillando (por lo menos algún momento) con los colores de un pavo real. Volvamos allí un día nublado y descubriremos que aquellos resplandores corresponden a vulgares manchas de grasa negra. Una burbuja de jabón parece como si tuviera anillos iridiscentes en su interior, aunque la película que lo forma sea transparente. También el detergente derramado en los ríos presenta colores aunque el detergente en sí sea blanco o incoloro. Está claro que este fenómeno tan difundido nos está contando algo sobre la naturaleza de la cualidad que llamamos color.

Si nos detenemos a pensar sobre este fenómeno no sólo sabremos cosas sobre el color, sino sobre la naturaleza de la misma luz. Este fenómeno pertenece a una gran clase de efectos físicos que actúan según un principio llamado interferencia. Y aunque ahora no parezca evidente, los colores de la mancha de petróleo están íntimamente relacionados con otras experiencias comunes como el cambio de tono en una nota de trombón cuando se saca la corredera o el comportamiento de los maremotos cuando se produce un terremoto en el mar.

Estos fenómenos dispares tienen de común entre sí estar formados por ondas. La manera más sencilla de visualizar un tipo cualquiera de onda es imaginar una perturbación en la superficie lisa de un estanque. La onda de la figura 22 es típica porque puede caracterizarse mediante tres números: la distancia entre crestas, que llamamos longitud de onda y que denotamos con la letra L, el número de crestas que pasan por un punto dado cada segundo, que nosotros llamaremos frecuencia y que denotamos con la letra F, y la velocidad con que se desplazan las crestas, que llamaremos velocidad y denotaremos con la letra V. En una playa, por ejemplo, el oleaje que llega a ella puede tener L = 3 metros, F = 6 crestas por minuto y V = 20 metros por minuto. Se deduce de las definiciones dadas que, si multiplicamos la distancia entre las crestas por el número de crestas que pasan en un

intervalo dado de tiempo, obtendremos la velocidad de la onda. Expresado en símbolos esto significa que V = L × F.

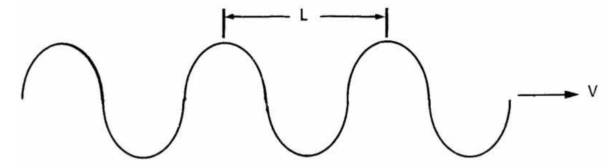


Fig. 22

En el problema de la mancha de petróleo, la propiedad más importante de las ondas explica lo que sucede cuando dos ondas diferentes se juntan. Podemos tener una situación así si tiramos dos piedras en un estanque. De cada piedra partirá una onda circular hacia fuera, y en el lugar donde entren en contacto los dos círculos que se propagan tendremos dos ondas juntándose en un punto. Lo que suceda en este punto depende de cómo lleguen las ondas. Si llegan como indica la figura 23 a la izquierda, con la cresta de una onda subiendo cuando la cresta de la otra también sube, las dos ondas se combinarán formando una única onda cuya altura será el doble de la altura de cada onda original. Esto se llama interferencia constructiva. En cambio si llegan como indica la figura 23 a la derecha, con la cresta de una onda llegando al mismo tiempo que el seno de la otra, las dos ondas se eliminarán y el resultado final será que el agua en aquel punto permanecerá inalterada. Esto se llama interferencia destructiva. Vale la pena cuando vayamos a un puerto grande en un día ventoso observar el movimiento de los barcos anclados allí. En un recinto de este tipo hay muchas ondas presentes, porque el oleaje inicial que llega a él se refleja en los muelles y rompeolas. Algunas embarcaciones situadas en puntos donde la interferencia es constructiva experimentarán sacudidas violentas, en cambio las situadas en puntos de interferencia destructiva apenas se moverán.

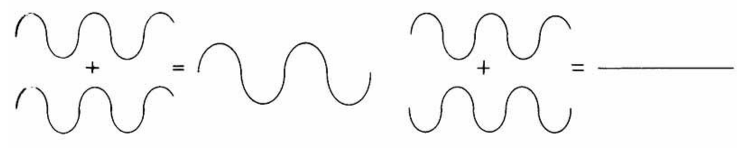


Fig. 23

La existencia de la interferencia destructiva es una característica única de las ondas. Si dos pelotas de béisbol o dos balas chocan en el aire, nunca podremos conseguir un resultado que corresponda a la ausencia total de materia. Siempre quedarán dos pelotas o dos balas (o sus fragmentos) después de la colisión. No sucede lo mismo con las ondas. Si la situación es adecuada pueden llegar dos ondas a un punto, juntarse y tener como resultado la ausencia total de cualquier onda. Esto es importante, porque significa que siempre podemos saber si una entidad determinada es una onda: basta ver si presenta interferencia.

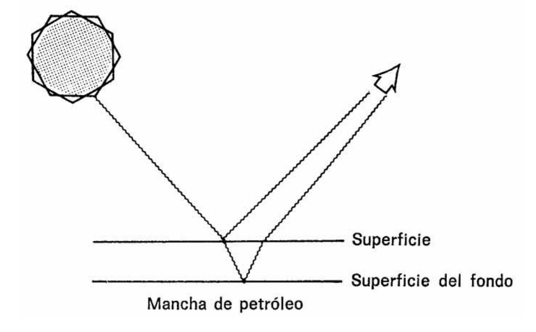
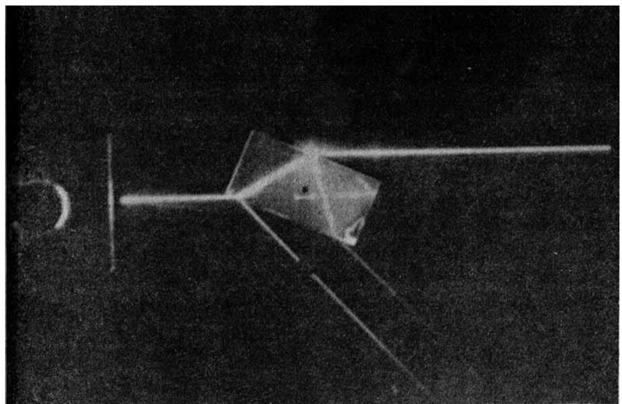


Fig. 24

Tomemos, por ejemplo, el caso de la luz solar sobre una mancha de petróleo. La presencia de la iridiscencia puede interpretarse como prueba de que la luz es una onda, no muy diferente de las ondas de un estanque en calma, porque la iridiscencia es, en realidad, un resultado de la reunión en nuestro ojo de dos ondas. La figura 24 muestra estas dos ondas. Una de ellas corresponde a la reflexión directa de la luz solar desde la superficie de la mancha de petróleo. La otra corresponde a la luz solar que penetra en el petróleo, se refleja en la superficie inferior y vuelve a salir al aire. O sea, que la mancha de petróleo actúa en cierto modo como el cristal de una ventana. La gente puede ver desde fuera sus reflexiones, lo que significa que parte de la luz se refleja en el cristal, pero los que están dentro pueden ver el exterior, lo que significa que parte de la luz atraviesa el cristal. Las dos ondas (una reflejada directamente, y la otra penetrando en el petróleo) inician su recorrido con sus crestas y senos alineados. Pero la segunda onda

tiene que recorrer una distancia mayor que la primera y cuando las dos alcanzan nuestro ojo ya no están alineadas. La segunda onda se habrá retrasado con respecto a la primera y las crestas que al principio estaban alineadas no llegarán juntas. O sea que, en general, esperaremos que tenga lugar una interferencia destructiva completa o parcial y que veamos o la ausencia de onda (oscuridad) o una luz muy débil.



La luz procedente de la izquierda que entra en una pieza rectangular de cristal es parcialmente reflejada y parcialmente transmitida en la superficie superior. Pueden verse fácilmente las trayectorias consiguientes de las dos partes del haz luminoso. Foto de Judith Peatross.

El único caso en que esto se cumplirá será cuando la distancia suplementaria que la segunda onda tiene que recorrer sea exactamente igual a un número entero de longitudes de onda. En tal caso la segunda onda se retrasará tanto que nos encontraremos con una situación igual a la de la figura 25.

La cresta B de la onda inferior, alineada inicialmente con la cresta A de la onda superior, se ha retrasado tanto que cuando las dos ondas alcanzan nuestro ojo está alineada con la cresta C. Si comparamos esta figura con la figura 23 que representa la interferencia constructiva, vemos que son iguales. Por lo tanto, podemos esperar que cuando la diferencia en la distancia recorrida por las dos ondas sea igual a una o más longitudes de onda, ten-

dremos una interferencia constructiva y, por lo tanto, veremos una luz brillante. (El razonamiento está ligeramente simplificado porque deja de lado ciertos efectos realmente presentes, como el desplazamiento de fase en la reflexión y la diferencia entre los caminos óptico y geométrico, pero es en esencia correcto.)

Podemos iniciar ahora nuestro análisis de la mancha de petróleo imaginando la situación representada en la figura 26, donde una luz de un único color incide con un ángulo dado sobre la mancha. Si miramos la mancha a la altura del ojo desde el punto A, como muestra la figura 26 a la izquierda, vienen indicadas dos ondas que se interfieren en el ojo (el hecho de que las ondas no sean precisamente paralelas no afecta en nada las conclusiones que obtengamos). En general la diferencia de las distancias recorridas por las ondas producirá una interferencia destructiva parcial o total, y el ojo recibirá poca luz. La persona situada en A no verá ningún color en la superficie de la mancha de petróleo. Por otra parte, existirá alguna posición, como la indicada por B a la derecha de la figura 26, en la que la diferencia de caminos recorridos por las dos ondas será exactamente suficiente para que las dos ondas se interfieran constructivamente. En este caso, el observador verá una banda de color sobre la mancha de petróleo.

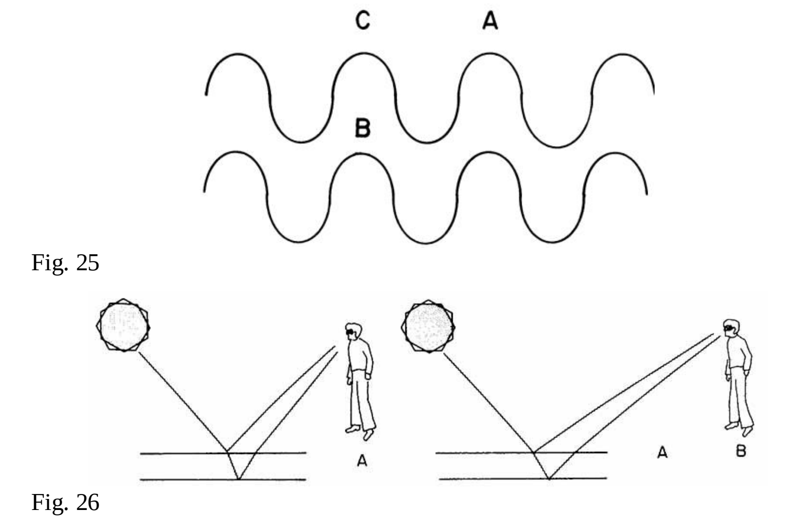


Fig. 25

Fig. 26

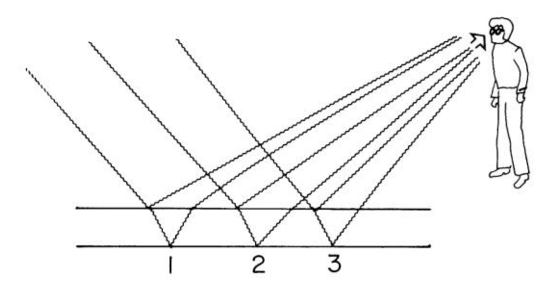


Fig. 27

Podemos dar un paso más con este análisis y preguntamos qué veríamos si nos quedáramos quietos cerca de la mancha de petróleo y recorriéramos toda la mancha con los ojos, como muestra la figura 27. En este caso, habría en la mancha de petróleo algunos puntos en los que se cumplirían las condiciones de interferencia constructiva. En estos puntos, denominados 1, 2 y 3, la segunda onda se ha retrasado una, dos y tres longitudes enteras de onda, respectivamente, con respecto a la onda reflejada en la parte superior de la mancha. En este caso veríamos una banda de color al mirar al punto 1, ningún color al mirar entre 1 y 2, una banda de color en 2 y así sucesivamente. En otras palabras, la mancha se presentaría del habitual color marrón sucio, con la excepción de varias bandas de color brillante, bandas correspondientes a las posiciones de la mancha donde la distancia hasta el ojo y los ángulos correspondientes son los indicados para que tenga lugar una interferencia constructiva.

Evidentemente una mancha de petróleo no está expuesta a un único color de la luz sino a una mezcla de todos los colores del espectro visible. La cualidad que percibimos como un color en realidad corresponde a la longitud de onda de la luz que incide en nuestro ojo. La luz roja tiene una longitud de onda más larga que la luz violeta, y los demás colores se distribuyen en medio de estos dos. Es fácil deducir la consecuencia de esto para el aspecto de la mancha de petróleo. Supongamos que miramos desde una distancia una mancha de petróleo iluminada por la luz solar, como indica la figura 28. Si miramos un punto concreto como el punto F, las ondas que recorren los dos caminos dibujados se interferirán al llegar a nuestros ojos. La diferencia de caminos producirá una interferencia parcial de la mayoría de colores (es decir, de la mayoría de longitudes de onda). Por lo tanto,

estos colores no aparecerán en la mancha. Sin embargo, habrá un valor de la longitud de onda (un color) para el cual esta diferencia de caminos es precisamente la diferencia necesaria para producir interferencia constructiva. Supongamos, por ejemplo, que en P se da una interferencia constructiva para la longitud de onda correspondiente a la luz verde; entonces cuando miremos el punto P de la mancha de petróleo veremos una banda verde. Este color aparece porque la luz solar contiene luz verde y en el punto P se cumplen las condiciones de interferencia constructiva para el color verde.

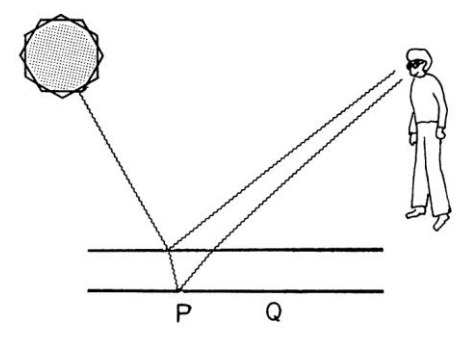


Fig. 28

De modo semejante si miramos el punto vecino indicado por Q en la figura 28, ya no se cumplirá la condición de interferencia constructiva para la luz verde, pero se cumplirá para otro color, por ejemplo el azul. En definitiva, cuando miremos la mancha veremos una serie de bandas de colores que (en principio) comprenderá todo el espectro visible. Ésta es la conocida iridiscencia del tipo pavo real.

Así pues, lo que vemos al entrar en una gasolinera nos permite llegar a dos conclusiones importantes sobre la naturaleza de la luz. En primer lugar, la luz es una onda y, en segundo lugar, los diferentes colores corresponden a diferentes longitudes de onda de esta onda luminosa.

¿Pero ondas en qué? Es fácil representamos una onda en el agua, porque todos hemos visto ondas u olas en mares o lagos. También es fácil imaginar una cosa tan corriente como una onda sonora, porque las crestas corresponden a regiones donde las moléculas de aire están más apretadas de lo normal. Pero es difícil formar la misma imagen mental referida a la luz, porque

sabemos que la luz puede desplazarse a través de grandes distancias en el espacio vacío sin experimentar cambios. ¿Qué es exactamente lo que está «ondeando» entre nosotros y el Sol cuando vemos la luz del Sol?

Antes, se pensaba que el espacio estaba lleno de una sustancia invisible e intangible llamada éter y que la luz era una onda en el éter del mismo modo que el oleaje es una onda en el agua. Esta idea se remonta a los griegos quienes suponían que el espacio entre la Tierra y las esferas celestiales estaba lleno de *algo*, y el concepto sobrevivió hasta bien entrado el siglo XIX. Aunque parezca extraño fue un experimento basado en la propiedad de interferencia de la luz lo que demostró que el éter universal imaginado por los científicos no existía.

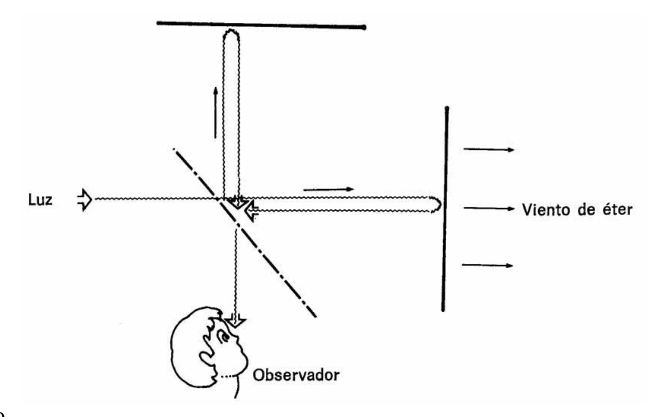
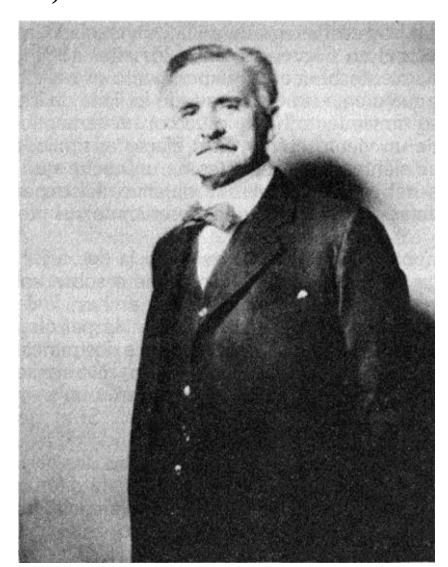


Fig. 29

Llevaron a cabo el experimento dos científicos, A. A. Michelson y E. W. Morley, del Instituto de Tecnología Case (que hoy está integrado en la Universidad Case Western Reserve) en Cleveland, entre los años 1881 y 1887. El razonamiento básico del experimento era el siguiente: Si existe realmente un éter que todo lo llena, la Tierra debido a su movimiento ha de estar constantemente en presencia de un viento etéreo. Este efecto es similar al de la brisa que sienten los ocupantes de un coche que avanza a través del aire en calma. El objetivo del experimento era detectar este viento etéreo observando sus efectos en la luz.

El montaje era básicamente el de la figura 29. La luz que llega de la izquierda incide primero sobre un espejo parcialmente plateado, que divide el haz, del mismo modo que la superficie de la mancha de petróleo divide el haz de luz en el ejemplo anterior. Las dos partes del haz se dirigen luego a espejos situados respectivamente en ángulo recto, se reflejan en ellos y vuelven a un punto donde pueden interferir el uno con el otro. Si el viento del éter está en la dirección indicada, soplando de izquierda a derecha, el tiempo necesario para que las dos partes de la onda recorran sus respectivos caminos será diferente, y se producirá algún tipo detectable de interferencia. (La mejor manera de visualizar este experimento es imaginar dos botes que parten de un punto en un río de corriente rápida. Un bote baja río abajo con la corriente y luego vuelve a subir contra la corriente. El otro ha de cruzar el río y volver hacia atrás avanzando en ángulo recto con la corriente. Es evidente que si los dos botes parten al mismo tiempo y se desplazan con la misma velocidad que en el agua inmóvil, por ejemplo poniendo sus motores a la misma velocidad, no regresarán al mismo tiempo al punto de partida.)



A. A. Michelson (1852-1931) llevó a cabo con E. W. Morley entre 1881 y 1887 un experimento con el cual demostró que el éter universal imaginado por los científicos no existía. Foto cedida por el Instituto Americano de Física, Biblioteca Niels Bohr.

Por diversos motivos este experimento suele hacerse orientando los espejos en una dirección relativa al supuesto viento de éter, haciendo las mediciones y luego repitiendo todo el proceso después de haber girado 90 grados el aparato, de modo que, sople por donde sople el viento, podrán captarse sus efectos. Pero este detalle no es esencial, porque de cualquier modo que se haga el experimento no se detecta ningún viento etéreo. Este viejo resultado se ha confirmado incluso con los modernos instrumentos de láser, y, por lo tanto, nos vemos obligados a deducir que o bien el movimiento de la Tierra es exactamente el mismo que el del éter (lo cual es, por lo menos, improbable) o bien el éter no existe. Uno de los primeros grandes resultados de Einstein en 1905 fue ofrecer una teoría lógica de la luz en la que eliminaba el concepto de éter por superfluo.

El experimento Michelson-Morley hace saltar una noción venerable sobre el espacio vacío. El espacio, sea lo que fuere, no está lleno de un éter capaz de transportar ondas luminosas. Y la luz, sea el tipo de onda que fuere, ha de poder atravesar el espacio vacío sin la ayuda de un éter.

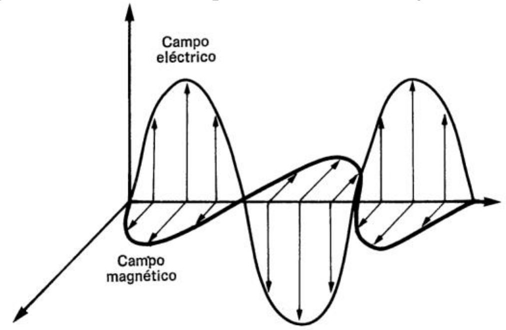


Fig. 30

La figura 30 muestra la imagen que el estudio teórico acabó produciendo. La luz se concibe como un conjunto de campos eléctricos y magnéticos, cada cual con la forma de una onda, situados en ángulo recto tanto el uno en relación al otro como en relación a la dirección de desplazamiento. Estas ondas son matemáticamente similares a las ondas del agua y a las ondas sonoras porque su forma se repite regularmente, pero se diferencian de ellas en que no son una onda en un medio. Son simplemente una

entidad ondulatoria capaz de moverse por sí misma, sin que la sostenga un éter.

Un aspecto de este concepto de la luz sugiere una generalización importante. Hemos visto que colores diferentes corresponden a longitudes de onda diferentes, pero el ojo humano sólo es sensible a una estrecha banda de longitudes de ondas. Si tenemos presente la representación gráfica de la naturaleza de la luz es natural preguntarse por la existencia de ondas semejantes a las de la luz, pero de longitudes de onda tales que el ojo humano no pueda verlas. La respuesta es positiva. En principio no hay nada que impida generar una onda como la representada en la figura 30 pero con cualquier longitud de onda. De hecho, la gran variedad de estas ondas en nuestra experiencia diaria nos hacen comprender que la luz visible es sólo un ejemplo especial del fenómeno más general de la radiación electromagnética. La luz visible es la porción del espectro a la cual el ojo humano es sensible.

La existencia de otras ondas aparte de las de la luz se predijo a fines del siglo pasado, y en 1890 el científico alemán Heinrich Hertz descubrió un tipo muy importante: la onda de radio. Se trata de ondas cuya estructura es igual a la de la figura 30 —campos eléctrico y magnético cruzados— pero cuya longitud de onda puede ir de un metro a muchos kilómetros.

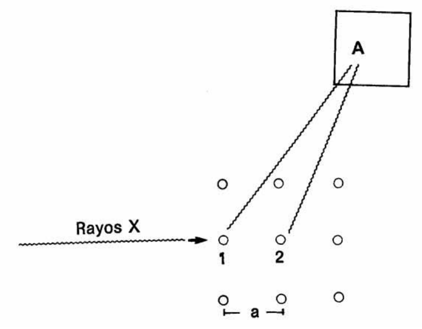


Fig. 31

A medida que la longitud de onda disminuye llegamos a las microondas (unos cuantos centímetros) y a las ondas infrarrojas (centésimas de centímetro). La luz visible sólo ocupa de hecho las longitudes de onda situadas entre $3,8\times10^{-5}$ cm (violeta) y $7,8\times10^{-5}$ cm (rojo). Luego, a medida que la

longitud de onda continúa disminuyendo pasamos por las ultravioletas, los rayos X y la radiación gamma. Todo este conjunto de ondas posibles se suele llamar espectro electromagnético, y es evidente que nosotros sólo podemos captar directamente una región muy pequeña del espectro. Sin embargo, con nuestros instrumentos podemos producir, detectar y utilizar el espectro entero.

Si todas las demás formas de radiación son ondas, lo lógico es suponer que presentarán interferencias, como la luz. Resulta que es así y este hecho tiene infinitos usos en la ciencia. Para dar un ejemplo, en 1912 el físico alemán Max von Laue hizo un experimento consistente en dirigir un haz de rayos X a un cristal y detectarlo al otro lado. La figura 31 muestra la disposición general. La idea del experimento es muy simple. Cada átomo en el cristal actúa como centro de dispersión de los rayos X incidentes. Por ejemplo, dos átomos vecinos (como los numerados con 1 y 2 en la figura 31) enviarán en todas direcciones rayos X dispersados. En general, las ondas que lleguen a un lugar como el punto A habrán recorrido distancias diferentes, y esta diferencia dependerá de la separación de los átomos en el cristal, separación que hemos notado por *a* en el dibujo. Ahora ya estamos acostumbrados a la idea de que si la diferencia es la adecuada habrá en A interferencia constructiva. Si revelamos una película normal de rayos X (la utilizada en los hospitales) estos puntos de interferencia constructiva aparecerán como manchas puntuales brillantes. Midiendo las posiciones de las manchas podremos deducir la diferencia que han de tener las longitudes de los caminos recorridos por rayos X procedentes de átomos diferentes, y de este modo podremos deducir la separación entre los átomos del cristal. Por lo tanto, las propiedades de interferencia de las ondas electromagnéticas nos permiten determinar la estructura de los sólidos, técnica ésta muy usada hoy en día tanto en la investigación como en la industria.

A fines del siglo XIX, la imagen ondulatoria de la luz no sólo había resultado suficiente para explicar los fenómenos observados, sino también muy útil en otros campos. Por desgracia había un fallo en esta imagen. Se sabía muy bien que si se dirigía una luz potente sobre ciertos metales, el metal emitía electrones. Esto se llamaba efecto fotoeléctrico y en principio el hecho no debería sorprendernos. Al fin y al cabo sabemos que alrededor de los núcleos atómicos hay normalmente electrones en órbita, y si la luz contiene realmente un campo eléctrico nada se opone a que pueda extraer

algunos electrones de sus respectivos átomos. Sin embargo, el problema no era el efecto sino la cantidad de tiempo necesario para liberar un electrón en órbita. En la imagen ondulatoria de la luz que hemos descrito, la interacción debería ser un proceso relativamente suave donde cada cresta sucesiva de onda empujaría un poquito más al electrón en su camino liberador. El problema es que este proceso debería ser lento y debería pasar un intervalo del orden de un segundo entre el momento de encender la luz y el de empezar a salir electrones. En realidad el proceso es prácticamente instantáneo. Los electrones empiezan a salir tan pronto como brilla la luz.

Einstein propuso una solución de este problema en 1905 (el mismo año en que publicó su teoría especial de la relatividad). Señaló que la velocidad del efecto fotoeléctrico podía explicarse suponiendo que por algún motivo la luz actúa como una partícula en una situación así. Si esto es cierto la expulsión del electrón de un átomo no será un proceso gradual, sino parecido más bien a la colisión de dos bolas de billar. Este concepto explica de modo exacto la velocidad con que es expulsado el electrón del metal y todas las demás características del proceso. (Uno de los hechos poco conocidos de la historia de la ciencia es que Einstein recibió el Premio Nobel en 1921 por este trabajo y no por el de la relatividad.)

Esta explicación puede ser satisfactoria desde el punto de vista del efecto fotoeléctrico, pero parece enfrentamos con una contradicción grave en relación a todos los casos en los que según sabemos la luz presenta interferencias y, por lo tanto, actúa como una onda. Al parecer estamos ante una situación paradójica: para explicar algunas cosas debemos decir que la luz es una onda, pero para explicar otras cosas debemos creer que actúa como una partícula. A principios del siglo XX este problema recibió el nombre de problema de la dualidad onda-partícula.

El efecto fotoeléctrico fue el primer toque de atención en este campo. En 1926 se descubrió que los electrones, concebidos normalmente como partículas presentan en ciertas circunstancias interferencias. ¡Parece que cuanto más sabemos sobre la estructura básica de la materia menos entendemos qué es!

En la década de los años veinte, algunos de los físicos de mentalidad más filosófica empezaban a preguntarse si la mente humana podría captar nunca la realidad del mundo subatómico. Más recientemente, Frijthof Capra, en *El Tao de la Física* (The Tao of Physics, Shambala Press, 1975) ha

afirmado que este tipo de paradoja demuestra que la ciencia occidental ha alcanzado su punto de fusión con la religión oriental, y que la única manera de «conocer» el mundo es mediante una especie de iluminación mística.

Bueno, quizá sí, pero mi propia experiencia como profesor me ha llevado a conclusiones bastante diferentes. Cuando mis estudiantes de Física 101 llegan al efecto fotoeléctrico no lo consideran en absoluto paradójico. Al principio esto me intrigaba, pero luego comprendí por qué. Nadie les había contado que cualquier cosa tenía que ser o bien una partícula o bien una onda. No había razón para suponer que un fotón o un electrón tuviera que ser o bien una pelota o bien una onda en un estanque, por lo tanto, no les sorprendía nada que no fuera así. Sólo un físico profesional, después de años de experiencia con objetos que tenían que ser una cosa u otra, podía tener esta idea preconcebida.

Por lo tanto, ¿se comportan los fotones a veces como partículas? Sí.

¿Se comportan como ondas? Desde luego.

¿Entonces, qué son? No son partículas, ni son ondas, ni son nada que podamos experimentar directamente con nuestros sentidos. Son fotones, y como tales son similares a todo lo que existe en el nivel de las partículas elementales.

Quizás una analogía pueda aclarar el tema. Imaginemos a un zoólogo que ha pasado toda su vida profesional en América del Norte. Este zoólogo conocerá una clase de cosas llamada mamíferos, que tienen sangre caliente y dan a luz a sus hijos vivos, y otra llamada reptiles, que tienen sangre fría y ponen huevos. Este zoólogo no tendrá problemas al estudiar por un lado a las ardillas y por otro a las serpientes. Pero supongamos que nuestro zoólogo se fuera a Australia y descubriera el ornitorrinco. Podría hacer una observación (medir la temperatura de su sangre) y llegar a la conclusión de que el ornitorrinco es un mamífero. También podría hacer otra observación (v. si pone huevos o no) y deducir que se trata de un reptil.

¿En qué estamos ahora? ¿Se pondrá el zoólogo a escribir artículos eruditos sobre la «dualidad mamífero/reptil»? ¿Desesperará nuestro hombre de que la mente humana puede entender nunca el descubrimiento del ornitorrinco? ¿Afirmará que la zoología ha entrado finalmente en contacto con el Oriente místico y cambiará su calculadora por un mantra?

Bueno, puede hacerlo, pero creo que la mayoría de nosotros juzgaríamos como bastante estúpida cualquiera de estas reacciones. La conclusión

correcta es admitir que el nuevo descubrimiento demuestra simplemente que las viejas categorías eran incompletas. La distinción «reptil/mamífero» (por lo menos tal como la hemos definido) es bastante razonable si limitamos nuestra atención a América del Norte, pero falla si nos trasladamos a otra región. Del mismo modo la distinción «onda/partícula» es razonable mientras limitemos nuestra atención a pelotas y estanques, pero nos falla cuando empezamos a considerar otras cosas muy pequeñas. El fotón y el electrón, como el ornitorrinco, son nuevos tipos de cosas que no pueden integrarse en el viejo esquema. Sus propiedades demuestran que necesitamos nuevas categorías, pero no hay motivo para deducir de ello que el método científico nos esté fallando.

Puede ayudamos a entenderlo un ejemplo histórico. Durante la Edad Media los filósofos naturales discutieron mucho sobre la manera de describir el movimiento de un proyectil, por ejemplo cuando tiramos con la mano una piedra. Según Aristóteles había dos tipos de movimiento: «natural» y «violento». El problema era saber cómo cambia el movimiento de un proyectil pasando de violento (cuando sale de nuestra mano) a natural (justo antes de caer al suelo) y en qué punto de su trayectoria se produce este cambio.

Si nos empeñamos en describir el movimiento según estas categorías, tenemos que admitir que el problema continúa irresuelto. Sin embargo, a partir de Newton los físicos han enfocado el problema desde un nuevo ángulo. Los científicos ahora dicen: «Puedo describir la trayectoria que describirá la partícula, y el punto donde estará y la velocidad de su movimiento en cualquier momento posterior a su lanzamiento. Ésta es una descripción completa del movimiento, y la clasificación entre movimiento natural y violento carece simplemente de sentido.» Si recordamos los éxitos de la ciencia moderna resolviendo todo tipo de problemas, desde los proyectiles hasta las sondas planetarias, la mayoría de nosotros pensaremos que se ha dado una respuesta razonable al problema medieval.

Del mismo modo, un físico del siglo XX enfrentado con la dualidad onda/partícula se limita a señalar que hoy podemos predecir el resultado de cualquier experimento posible con electrones y fotones. Ya no aplicamos a las nuevas entidades las categorías de partículas o de ondas, del mismo modo que no utilizamos las categorías de movimiento natural o violento. No hay motivo para que un físico aplique estas categorías y, por lo tanto,

todo el debate sobre la naturaleza real de las partículas elementales más que paradójico se convierte en inútil. El físico prefiere ignorar el problema de etiquetar las cosas que se estudian y se concentra en estudiar su comportamiento real.

¿Parece razonable, no?

V. ¿POR QUÉ NO VEMOS NUNCA UN ARCO IRIS EN INVIERNO?

El arco iris es uno de los espectáculos más bellos de la naturaleza, y como tal figura de modo prominente en el folklore y la mitología. En la tradición judeo-cristiana, por ejemplo, el primer arco iris apareció después del diluvio y representó una promesa hecha a Noé. Como dice el autor del Génesis (9:13-15): «Pongo mi arco en las nubes para señal de mi pacto con la tierra, y cuando cubriere yo de nubes la tierra, aparecerá el arco y me acordaré de mi pacto... y no volverán las aguas del diluvio a destruir toda carne».

El arco iris siempre aparece durante o después de la lluvia, e incluso los antiguos comprendieron que su aparición tenía algo que ver con la luz solar y las gotas de agua. Sin embargo, hubo que esperar a 1637 para que el filósofo y matemático francés René Descartes diera la primera explicación detallada (y esencialmente correcta) de la formación del arco iris. El arco iris resulta estar relacionado con un efecto familiar: la desviación que experimenta la luz en un material denso.

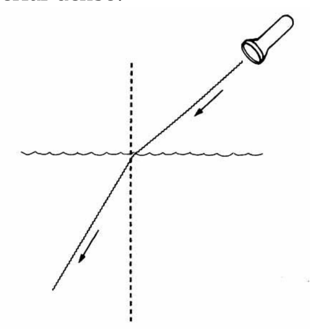


Fig. 32

Este efecto puede verse de muchas maneras. Quien tenga una mentalidad experimentadora puede formar un haz estrecho de luz tapando con cinta adhesiva el cristal de una linterna para dejar solamente una rendija

estrecha. Si dirigimos este haz hacia un acuario lleno de agua veremos algo parecido a lo representado en la figura 32. El haz de luz se desviará hacia la perpendicular al entrar en el agua. (Sólo no habrá desviación cuando dirijamos la luz perpendicularmente a la superficie del agua.) Quien prefiera no hacer experimentos o no disponga de un acuario a mano, puede intentar el viejo truco escultista de probar de encender fuego con una lupa enfocando los rayos del Sol sobre algo de yesca (v. fig. 33). En este caso los rayos paralelos del Sol se curvan al entrar en el cristal de la lupa. Las dos situaciones descritas se basan en el cambio de trayectoria de los rayos de luz cuando atraviesan la superficie de separación entre medios de densidades diferentes, fenómeno llamado refracción.

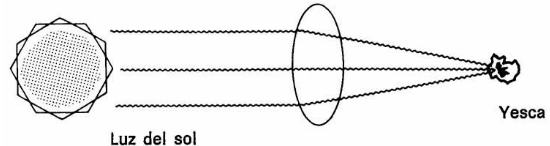


Fig. 33

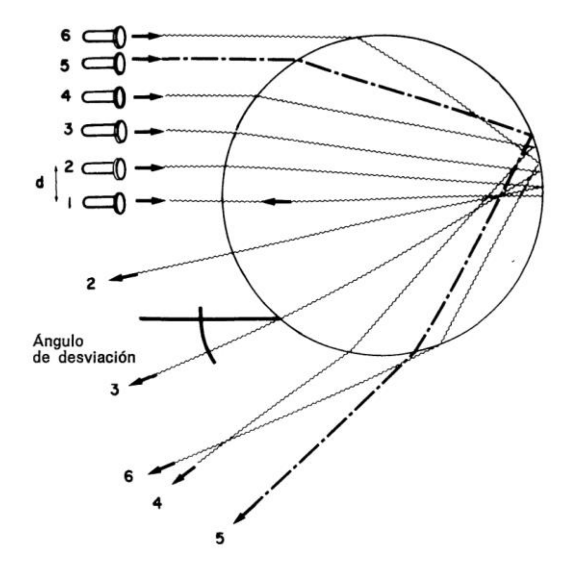


Fig. 34

La teoría del arco iris de Descartes se basa en la observación de que habrá refracción cuando la luz del Sol incida sobre una gota de agua en el aire, del mismo modo que la luz de la linterna se desvía en el experimento anterior. Es más fácil comprender la teoría si imaginamos que dirigimos sobre la gota de agua la luz de una pequeña linterna, escogiendo una linterna que emita solamente un color de luz. En la figura 34 vemos el camino que recorrerá la luz a través de la gota para varias posiciones de la linterna. Si sostenemos la linterna en la posición 1, sobre el eje de la gota, la luz se dirige directamente a la parte trasera de ella, se refleja y vuelve sin desviarse a la posición inicial. Si desplazamos la linterna una distancia d, subiéndola a la posición 2, la refracción empieza a ser importante. La luz incide sobre el agua con un cierto ángulo, y sufre la desviación indicada. Llega a la parte posterior de la gota, se refleja y se desvía de nuevo cuando sale de la gota. La luz salió de la linterna con una trayectoria horizontal, pero sale de la gota formando un ángulo. El ángulo entre las direcciones final e inicial del rayo se llama ángulo de desviación.

Si desplazamos ahora la linterna la misma distancia d hasta la posición 3, sucede lo mismo. La luz que sale de la gota está más desviada todavía que la de la posición 2. Sin embargo, resulta que si bien la posición 3 está el doble de lejos del eje que la posición 2, la desviación del rayo 3 no es el doble de la desviación del rayo 2 sino algo menor. Sucede lo mismo cuando nos desplazamos a la posición 4, a una distancia del eje triple de la distancia del punto 1.

El resultado del anterior análisis es lo siguiente: A medida que vamos alejando la linterna del eje, la desviación del rayo aumenta cada vez menos. En otras palabras, los rayos desviados empiezan a «amontonarse» al desplazar la linterna. Finalmente este proceso alcanza su límite en la posición número 5, que representa el máximo ángulo de desviación que puede tener la luz cuando incide sobre la gota. Si subimos más arriba la linterna, por ejemplo a la posición 6, el rayo experimentará una desviación inferior a la de la posición 5. Digamos como referencia que el ángulo de desviación correspondiente a la posición 5 es de unos 42 grados.

Podemos sacar dos conclusiones importantes de este ejercicio. En primer lugar toda la luz que se dispersa desde una gota esférica de agua ha de tener un ángulo de desviación inferior a 42 grados, y segundo, debido al

efecto de amontonamiento, la luz de un gran número de posiciones de la linterna se concentrará alrededor de este mismo ángulo de 42 grados.

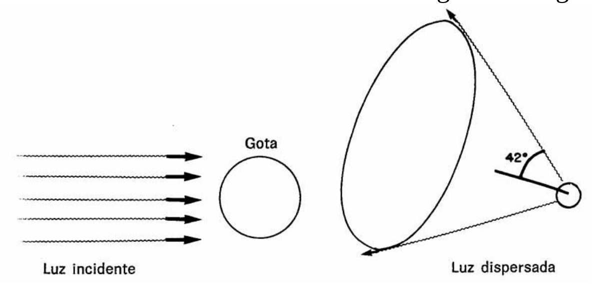


Fig. 35

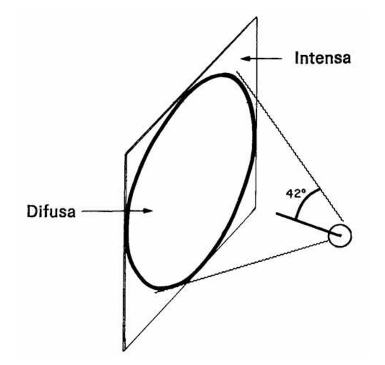


Fig. 36

Con esta información podemos pasar a examinar una situación algo más parecida a un arco iris real. Supongamos que en lugar de iluminar la gota con el haz estrecho de una linterna, hacemos incidir sobre ella una banda ancha de haces paralelos, conservando de momento la limitación de que la luz sea de un solo color. Esta situación está representada en la izquierda de la figura 35. Podemos imaginar la banda de luz paralela como un conjunto de haces estrechos, de modo que la luz que incide sobre la gota pueda considerarse proyectada por un gran número de linternas puestas verticalmente formando columna. Utilizando entonces los resultados del ejemplo anterior podemos ver cómo la gota dispersa la luz que cae sobre ella. La luz próxima

al eje de la gota saldrá de ella con ángulos inferiores a los 42 grados. Sin embargo, a medida que nos separamos del eje, la luz tenderá a salir más cerca del ángulo de 42 grados. Esto significa que la luz que sale de la gota puede imaginarse concentrada en un cono (dibujado a la derecha de la figura 35) formado por este ángulo, con una iluminación difusa dentro del cono. Si dejamos que esta luz se proyecte sobre una pantalla veremos una figura como la dibujada en la figura 36.

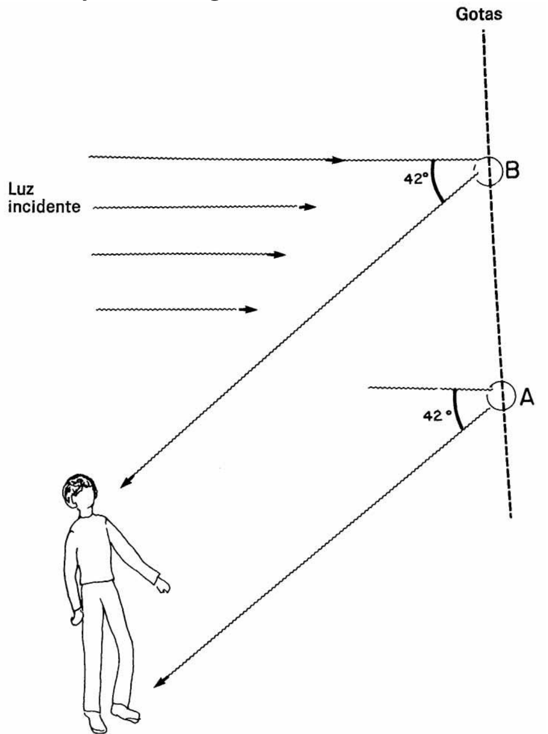


Fig. 37

Supongamos ahora que una lluvia de pequeñas gotas está cayendo en el cielo y que se iluminan con luz de un solo color. Si nos ponemos de espal-

das a la luz como en la figura 37, ¿qué veremos? Sabemos que la luz dispersada por cada gota está concentrada en un cono de 42 grados, por lo tanto, si miramos hacia una gota como la gota A de la figura 37, desde la cual el ángulo entre la luz incidente y la línea de nuestros ojos es inferior a 42 grados no veremos mucha luz. De hecho estaremos mirando la luz difusa del interior del cono brillante. En cambio, si miramos a una gota situada en la posición B, donde el ángulo *es* de 42 grados, la luz brillante del cono llegará a nuestro ojo, y el punto B parecerá un punto brillante en el cielo.

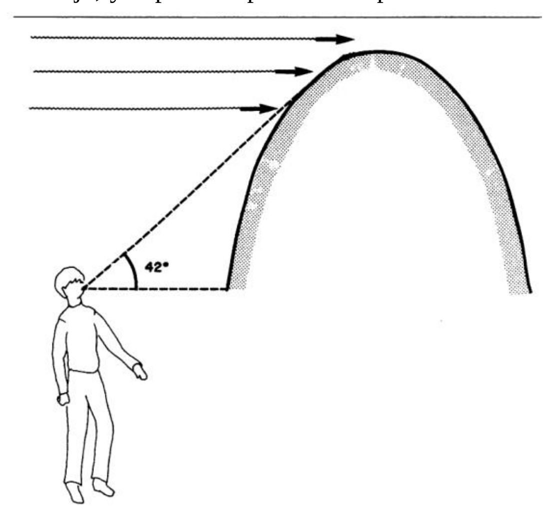


Fig. 38

El mismo argumento es válido para un punto situado a la derecha o a la izquierda del observador. De hecho, cualquier punto del cielo donde el ángulo entre la luz incidente y la línea que va a los ojos del observador sea de 42 grados, aparecerá brillante. El resultado final es que habrá puntos brillantes en el cielo procedentes de cada gota donde se cumpla esta condición, y la suma de estos puntos brillantes será un arco de luz brillante en el cielo. El observador verá luz dispersa concentrada procedente de cada gota situada en un cono de 42 grados, como muestra la figura 38. Esto explica la forma del arco iris.

Por lo tanto, la configuración general del arco iris puede comprenderse con bastante facilidad en función de la refracción experimentada por la luz en las gotas de agua del aire. Pero ¿cómo se explica el rasgo más notable del arco iris: sus colores? ¿Se puede entender del mismo modo?

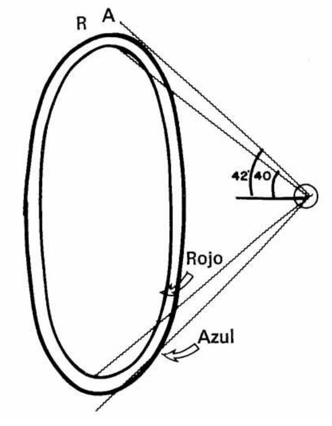


Fig. 39

Quizás el lector se pregunte por qué todo lo discutido hasta ahora se ha limitado a fuentes de luz de un solo color. La razón es muy sencilla: en la mayoría de materiales (incluyendo el agua) el grado de refracción varía ligeramente de un color al siguiente. Pronto discutiremos más a fondo este detalle, pero para nuestro objetivo actual indicaremos que el «ángulo mágico» en el cual la luz queda concentrada por una gota de agua varía de unos 40 grados (en el azul) a unos 42 grados (en el rojo). La luz solar es una mezcla de todos los colores del espectro visible, por lo tanto, cada gota no produce un único cono, sino muchos. Estos conos, como vemos en la figura 39, están embutidos uno dentro de otro. Repasando el argumento anterior nos convenceremos de que la situación descrita dará origen a una serie de arcos en el cielo de colores diferentes cuando miramos la luz solar reflejada por una lluvia de gotas de agua. Por lo tanto, el arco iris multicolor puede explicarse también en función de simples conocimientos físicos.

Un punto implícito de esta explicación pero que deberíamos exponer explícitamente es que en cada instante la luz procedente de partes diferentes del arco nos llega de gotas de lluvia diferentes. Esto está dibujado en la

figura 40. Un observador verá un arco azul en el punto B (con un ángulo de 42 grados) y un arco rojo en el punto A (con un ángulo de 40 grados), y una gradación de colores entre estos dos extremos. Está claro que la luz procedente de estos dos lugares del cielo corresponde a emisiones de dos gotas diferentes. Y a la inversa, a medida que una gota sola cae de B a A, contribuirá a partes diferentes del arco iris, porque sus conos multicolores embutidos irán desfilando ante el ojo del observador.

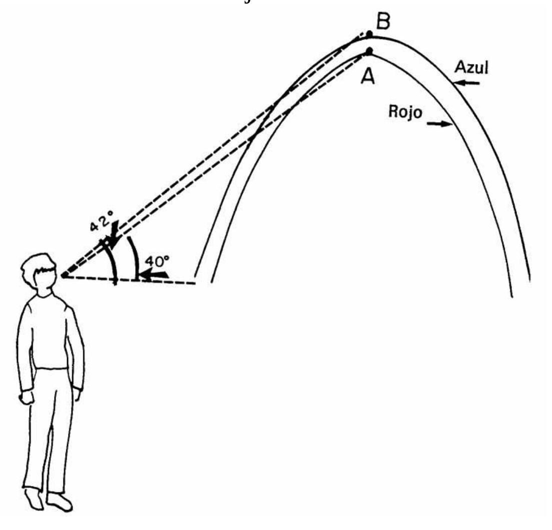


Fig. 40

Esta explicación original del arco iris, con unas pocas modificaciones técnicas, ha superado la prueba del tiempo. Los perfeccionamientos son demasiado numerosos para que podamos tratarlos aquí, pero podríamos señalar que también puede explicarse con bastante sencillez un fenómeno interesante, el arco iris doble.

Cuando la luz entra en una gota de agua puede seguir muchos otros caminos además del que hemos ya considerado. No es demasiado difícil demostrar que la luz que sigue una trayectoria como la de la figura 41 tenderá a concentrarse en un ángulo de 51 grados, por lo que si las condiciones son adecuadas deberíamos ver a veces un arco doble: el normal y este segundo. Desde luego los arcos iris dobles no son muy raros, aunque son lo

bastante insólitos para que valga la pena detenemos un rato a observarlos cuando se producen. A veces pueden verse otros arcos débiles dentro del arco principal, fenómeno éste causado por la interferencia (proceso que discutimos en el cap. 4). De hecho lo único que no podemos ver es un arco iris en invierno.

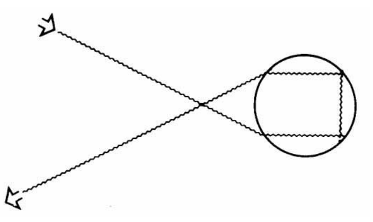


Fig. 41

El motivo de esta ausencia debería ya ser claro. La formación del arco iris depende de la presencia de gotitas de agua en el aire, y durante el invierno no llueve, nieva.

Quizás el ejemplo de laboratorio más conocido de los procesos que dan origen a un arco iris es la dispersión de la luz en bandas diferentes de color por un prisma de cristal corriente. Se supone que Newton fue el primero que utilizó esta técnica para demostrar que la luz solar está formada por el espectro entero de colores. La figura 42 muestra el principio del prisma. La luz se desvía al entrar en el cristal y al salir de él, y puesto que la luz roja se desvía menos que la violeta seguirá un camino diferente y saldrá por encima del camino recorrido por la luz violeta. Por lo tanto, si ponemos una pantalla a la derecha del prisma veremos el efecto del arco iris: una sucesión de colores a través del espectro, del rojo al violeta. Como es lógico si no hubiera prisma veríamos solamente una mancha de luz blanca.

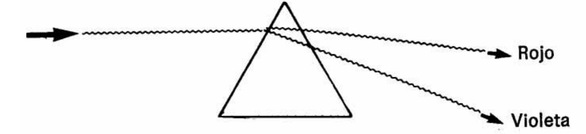


Fig. 42

El hecho de que el prisma separe la luz en sus colores constituyentes (propiedad llamada dispersión) ha sido de gran utilidad para los científicos

en muchos campos. Uno de los hechos importantes descubiertos sobre los átomos en el siglo pasado fue que cada elemento emite ciertas longitudes de onda muy definidas cuando se calienta. El ejemplo más corriente de esta propiedad lo observamos en el alumbrado de las calles. Las lámparas de vapor de mercurio como las empleadas comúnmente en las calles principales de las ciudades emiten una luz azulada, mientras que el vapor de sodio, utilizado a menudo en los cruces de carreteras, es amarillo. Por lo tanto, incluso el ojo humano en ciertas circunstancias puede saber qué elementos químicos están presentes en una lámpara mirando la luz que emite.

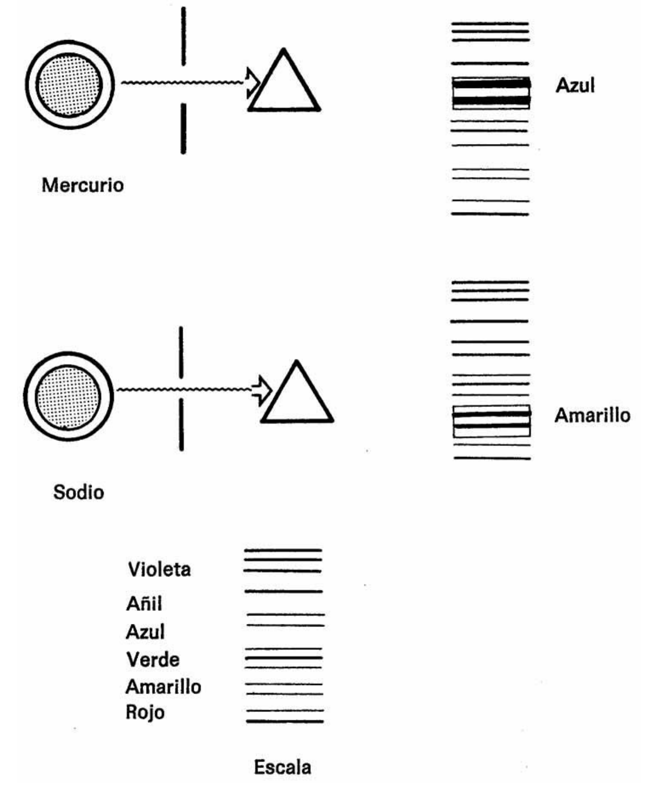


Fig. 43

Un prisma al dispersar los colores puede hacer esta identificación mucho más precisa. Si proyectáramos la luz de una lámpara de vapor de mercurio sobre un prisma como el de la figura 43, no veríamos una mancha azulada en la pantalla, sino una serie de líneas muy estrechas (vemos líneas porque enviamos la luz a través de una rendija). Si la lámpara fuera de sodio veríamos un conjunto de líneas totalmente diferente. Una lámpara de mercurio nos parece ligeramente azul porque, a pesar de la presencia de muchos colores, la línea azul es la más intensa. Del mismo modo las líneas amarillas del sodio avasallan a los demás colores cuando vemos su luz a simple vista. Una de las disciplinas principales de la física atómica se ocupa de explicar por qué cada átomo emite los colores que emite.

Un conjunto de líneas se llama espectro del elemento estudiado, y las líneas por separado se llaman líneas espectrales. Sea cual fuere la fuente de luz, si contiene mercurio o sodio se verán las mismas líneas cuando la luz de esta fuente pase por un prisma. Las consecuencias de esto para la astronomía son extraordinarias, porque el prisma funcionará igual tanto si la luz que le llega procede de una lámpara de laboratorio como si procede de una estrella distante. En ambos casos proporcionará sin falta un espectro que puede luego analizarse para saber qué elementos produjeron la luz. Y la relativa abundancia de dos elementos presentes en la fuente puede determinarse comparando las intensidades de las líneas correspondientes a un elemento con las correspondientes al otro. Esta técnica es tan potente que hasta hace muy poco sabíamos más cosas sobre la composición química de estrellas distantes —incluso de estrellas en otras galaxias— que sobre los planetas y lunas de nuestro propio Sistema Solar, que brillan con luz reflejada.

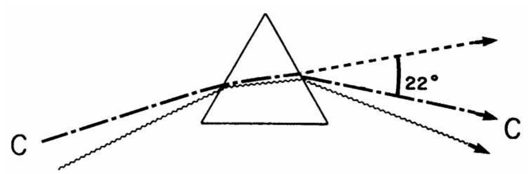


Fig. 44

El prisma tiene otra propiedad interesante, aparte de su utilización como espectrómetro. Si ponemos un prisma ante una superficie blanca y proyectamos un rayo de luz hacia él formando un ángulo, la luz que sale del prisma

formará una imagen hacia abajo. Si desplazamos la fuente hacia arriba la imagen se desplazará también hacia arriba hasta alcanzar un cierto ángulo critico (es la trayectoria C de la fig. 44). Si se sube todavía más la fuente, la imagen del punto se desplazará de nuevo hacia abajo. Este comportamiento no es muy diferente del que esbozamos antes en relación con la gota de lluvia (fig. 34), y un razonamiento similar nos hace esperar una concentración de la luz que incide sobre una cara del prisma con el ángulo correspondiente a la trayectoria C. Digamos como dato que la trayectoria C para un prisma con un ángulo de 60 grados en las esquinas produce una desviación total de la luz incidente en un ángulo aproximado de 22 grados. Esto significa que si tuviéramos un conjunto de prismas en el aire deberían formar un arco cuya medida angular fuera de 22 grados.

Hemos visto que en invierno no aparecen arcos iris porque el agua se hiela. ¿Podemos dar un paso más y preguntamos cómo responde el hielo cuando recibe la luz solar? Todos sabemos que los copos de nieve (una especie de agua helada) tienen seis lados. La forma exacta de un cristal de hielo depende de las condiciones en el momento de su congelación, pero las dos formas más corrientes (aparte de los copos de nieve) son una columna larga, delgada, como un lápiz de seis lados, y un hexágono plano, como un indicativo de stop de seis lados.

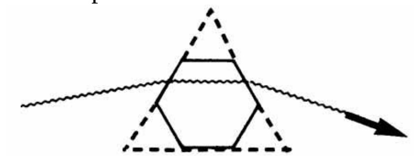


Fig. 45

Si la luz solar incidiera sobre el lado de un cristal en forma de lápiz, seguiría una trayectoria como la de la figura 45. De hecho el cristal de hielo se comporta con la luz igual que un prisma cuyos lados formen un ángulo de 60 grados. Hemos prolongado los lados del cristal con líneas de puntos para indicar su semejanza con un prisma. Esto significa que si los cristales de hielo están cayendo en el aire de modo que la luz solar incida sobre sus lados más largos, la luz que atraviese estos cristales tenderá a concentrarse en un ángulo de 22 grados. Si estamos mirando el Sol (o incluso la Luna) a

través de un conjunto de tales cristales (v. fig. 46) veremos un círculo brillante centrado en el Sol con un tamaño angular de 22 grados. (Los argumentos conducentes a esta conclusión son idénticos a los que nos llevaron al arco iris de 42 grados.) Es el llamado halo de 22 grados que puede verse alrededor del Sol o de la Luna cuando el tiempo es claro y frío. Se diferencia del arco iris en que la luz brillante que vemos es luz transmitida por el cristal y no luz dispersa como la de la gotita de lluvia. En la región centrooccidental de Estados Unidos, donde me crié, se dice que un halo alrededor de la Luna pronostica nieve al día siguiente. Este ejemplo de folklore meteorológico puede ser cierto o no. pero un halo así indica la presencia de cristales de hielo en el aire.

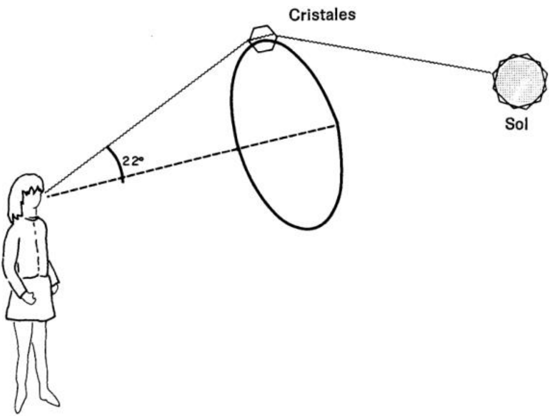


Fig. 46

El halo de 22 grados es el efecto más conocido de la interacción de la luz con cristales de hielo, pero es sólo un ejemplo de un gran número de manifestaciones semejantes. Robert Greenler en su excelente libro Arcos *iris*, *halos* y *esplendores* (Rainbows, Halos and Glories, Cambridge University Press, 1980) señala no menos de veintidós efectos observados en el cielo por la presencia de varios tipos y orientaciones de cristales. Por ejemplo, los «perritos del Sol» (puntos brillantes observados al mismo nivel del Sol y a 22 grados de distancia de él) se deben al paso de la luz por cristales planos como los de la izquierda de la figura 47. Los pilares solares (una columna de luz sobre el Sol) se deben a la reflexión sobre el lado más largo

de cristales con forma de lápiz que caen de punta, como vemos en la derecha de la figura 47. La luz puede jugar de muchas maneras con estos dos tipos de cristales, y esto explica el gran número de posibles manifestaciones.

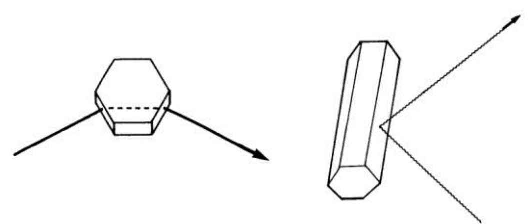


Fig. 47

Hay otro aspecto interesante de este tema. Robert Greenler es un físico atmosférico de la Universidad de Wisconsin-Milwaukee. Su interés por estas manifestaciones está relacionado, en parte, con lo que él llama arqueología celeste. Sabemos que en el pasado se han visto muchas cosas extrañas en el cielo, y a veces estas cosas quedan registradas, o bien en la mitología o bien en escritos astronómicos. Por ejemplo, el 20 de febrero de 1661 apareció sobre el cielo de Gdansk, Polonia, una compleja serie de arcos. En las intersecciones de estos arcos había puntos brillantes. Las intersecciones eran siete, por lo que este fenómeno recibió el nombre de «siete soles». Tomó nota de él el astrónomo Hevelio, o sea que tenemos una observación precisa de su aparición. El 18 de junio de 1790 apareció en Rusia una serie compleja de arcos con seis soles aparentes, concretamente en el cielo de San Petersburgo y el espectáculo duró desde las 7:30 de la mañana hasta pasado el mediodía. Los dos fenómenos fueron muy insólitos y complejos, pero Greenler pudo demostrar basándose en algunas simulaciones de ordenador que cada uno de ellos (y algunos fenómenos modernos) podían producirse mediante una determinada mezcla de cristales de hielo en el cielo.

Este resultado quizá parezca interesante, pero no muy actual. Pocas personas han oído hablar de los fenómenos originales, y no es probable que encontrarles una explicación se merezca un titular de primera página.

Quizá no, pero durante las últimas décadas se han publicado varias teorías seudocientíficas, muy difundidas, que se basan mucho en notas histó-

ricas de fenómenos celestes insólitos. El abuelito de esta familia de fantasías se publicó en *Mundos en Colisión,* en 1950, de Immanuel Velikovsky. El autor, que basa sus argumentos en acontecimientos astronómicos registrados en obras antiguas, por ejemplo, la historia del Libro de Josué donde el Sol detiene su curso, asegura que en tiempos históricos el planeta Venus fue expulsado de Júpiter, dio unos cuantos tumbos por el Sistema Solar provocando efectos celestes espectaculares y finalmente se asentó en su actual órbita. Más recientemente, la obra *Carros de los Dioses* de Eric von Daniken se unió a este despliegue de estupidez intelectual, basándose también parcialmente en casos observados de fenómenos celestes insólitos. Y desde luego si así lo deseamos podemos incluir en esta lista las habituales observaciones de ovnis.

Todas estas «teorías» tienen algo en común: la suposición implícita de que los fenómenos insólitos han de tener explicaciones insólitas, especialmente si estos fenómenos incluyen algún tipo de manifestación celestial. Pero la lógica exige que antes de aceptar una explicación poco probable nos convenzamos de que los fenómenos no pueden tener un origen más mundano. Por esto, iniciativas como las de Greenler tienen tanta importancia, porque nos demuestran que fenómenos espectaculares e insólitos pueden tener explicaciones que descansan sobre principios físicos simples.

Por ejemplo los siete soles sobre Gdansk que ya hemos descrito es un fenómeno por lo menos tan espectacular como cualquiera de los que Velikovsky usa para «demostrar» su tesis. Podemos imaginar que si este fenómeno hubiera ocurrido unos miles de años antes en una civilización carente de un conocimiento avanzado de la astronomía, algún cronicón habría tomado nota de él en términos mitológicos, quizás interpretándolo como una batalla entre el dios sol y sus hijos. Sería divertido ver como Velikovsky y sus seguidores habrían intentado explicar el fenómeno en función de los movimientos erráticos del planeta Venus. Sin duda Von Daniken habría afirmado que era la crónica de una batalla en el espacio. Pero nosotros tenemos la suerte de disponer de observaciones precisas del hecho real, y podemos explicarlo en términos relativamente sencillos, sin tener que suspender ni las leyes de la mecánica celestial, como Velikovsky quería que hiciéramos, ni las leyes del sentido común, como deberíamos hacer para aceptar la existencia de antiguos astronautas.

Como es lógico este argumento contra la credibilidad de las explicaciones seudocientíficas de hechos históricos se basa puramente en las leyes de la física. Un científico, citado en la revista *Astronomía,* señaló otro tipo de argumento. «Si uno quiere aceptar estas historias» dijo, «ha de creer que los autores antiguos nunca mentían, nunca exageraban y nunca recurrían a la hipérbole para dar mayor importancia a sus historias. Esta creencia viola de tal modo las leyes de la naturaleza humana que ante ella palidecen las violaciones de las leyes de la física.»

O sea, que cuando en una fiesta alguien nos acorrale en un rincón y nos cuente que la rueda de Ezequiel era, en realidad, una nave espacial o que el maná que comían los israelitas era, en realidad, parte de la atmósfera del planeta Venus, recordemos lo mucho que puede explicarse recurriendo simplemente a la interacción de la luz solar con un prisma.

VI. ¿POR QUÉ LAS MONEDAS NO SE PEGAN A LOS IMANES?

El magnetismo siempre me ha parecido la fuerza más misteriosa de la naturaleza. Recuerdo un sueño especialmente vivido que tuve cuando estudiaba el doctorado y en el cual capté de repente algo que no sólo me permitió utilizar las ecuaciones del magnetismo, sino que me permitió *comprender:* ver el papel que juega el magnetismo dentro de todo el sistema cósmico. Por desgracia cuando me desperté recordé el sueño pero no pude recuperar aquel algo, por lo que tuve que continuar estudiando el tema de modo convencional. Yo creía que era el único físico que opinaba de este modo sobre el magnetismo, pero recientemente oí una conferencia del premio Nobel Edward M. Purcell, de la Universidad de Harvard, y también él confesaba sentirse como ante un misterio al pensar en los imanes.

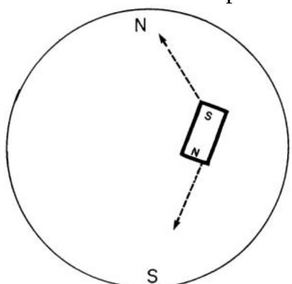


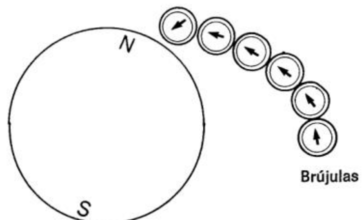
Fig. 48

Quizá pueda comunicar algo de este sentimiento describiendo unas cuantas cosas que podemos hacer con barras normales de imán. Sabemos que cualquier extremo de un imán atrae objetos de hierro, como clavos, pero que los imanes no atraen las cosas fabricadas de aluminio o de cobre. Si envolvemos el imán con la mano continuará atrayendo los clavos. El magnetismo, sea lo que fuere, es capaz de atravesar nuestro cuerpo. Podemos convertir un clavo en un imán frotándolo con otro imán, pero si calentamos el clavo los efectos magnéticos desaparecen. Si dejamos flotar una

barrita de imán sobre un corcho en un recipiente con agua se alineará siguiendo la dirección norte-sur (éste es el principio en que se basa la brújula). El extremo del imán que señala el norte se llama polo norte. Si acercamos el polo norte de un imán al polo sur de otro, los dos imanes se pegarán. Si acercamos el polo norte de uno al polo norte de otro, estos dos polos se repelarán. Después de ver todos estos efectos (que constituyen sólo una pequeña parte del fenómeno que llamamos magnetismo) no es difícil justificar la calificación de *misterioso.*

Quizá la mejor manera de discutir los imanes es pensar en la brújula. Sabemos que los imanes ejercen fuerzas los unos sobre los otros, por lo tanto la manera más fácil de explicar la alineación de la aguja de una brújula es suponer que la tierra es también un imán gigantesco, que sólo se diferencia por su tamaño y su fuerza de los que venden en las ferreterías. En tal caso, un imán situado en cualquier punto de la superficie de la Tierra estará sometido a dos fuerzas (v. fig. 48): El polo norte del imán será atraído hacia el polo magnético sur de la Tierra, y el polo sur del imán será atraído hacia el polo magnético norte de la Tierra. Estas dos fuerzas tenderán tendencia a hacer girar el pequeño imán sobre su eje hasta dejarlo alineado en la dirección norte-sur.

Hay aquí un difícil problema de nomenclatura que conviene aclarar. Sabemos que el polo norte de un imán repele el polo norte de otro imán. Por lo tanto, si llamamos polo norte de la brújula al extremo de la aguja de la brújula que señala al norte, debemos aceptar que el polo sur del imán terrestre está situado en Groenlandia. Sin embargo, de acuerdo con el uso (y con la geografía) el polo magnético de Groenlandia se llama polo norte magnético de la Tierra. Esta terminología es muy razonable y la utilizaremos aunque pueda causar confusión de vez en cuando.



Fíg. 49

Es posible con una brújula explorar el campo magnético que rodea un imán, incluso el que envuelve la Tierra. Basta con que pongamos una pequeña brújula cerca del polo de la Tierra y que señalemos la posición de sus dos extremos, cabeza y cola. Podemos poner entonces una segunda brújula cerca de la primera con la cabeza de la segunda cerca de la cola de la primera. Si continuamos añadiendo brújulas de este modo (v. fig. 49), empezará a formarse una línea. Si dibujamos luego un mapa con todas las líneas diferentes que puedan trazarse del modo descrito cerca de la Tierra, obtendremos un esquema como el de la izquierda de la figura 50. Si hacemos lo mismo alrededor de un imán corriente obtendremos un dibujo como el de la derecha de la figura 50. La semejanza entre las dos formas es sorprendente. La forma característica del campo magnético que aparece en la figura se presenta siempre con imanes que tienen dos polos (norte y sur) y por tal motivo se llama campo dipolar. Todos los imanes naturales conocidos producen campos dipolares.

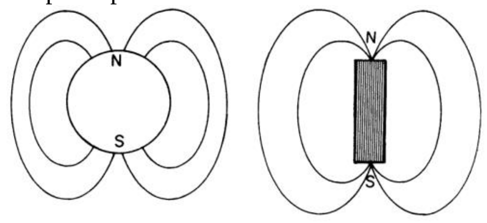


Fig. 50

Si dejamos la descripción de los efectos magnéticos y empezamos a preguntamos cuáles son las causas del magnetismo, nos veremos obligados a enfrentamos con un hecho todavía más misterioso. Una aguja de brújula situada cerca de un hilo por donde pasa una corriente eléctrica se desviará exactamente como la habría desviado la Tierra u otro imán. Este hecho básico conduce a la unificación de la electricidad y del magnetismo, como veremos en el capítulo 12. Si un hilo largo transporta electricidad por su interior, el campo magnético que produce estará formado por una serie de círculos concéntricos, como vemos en la izquierda de la figura 51. Sin embargo, si doblamos el hilo que transporta la corriente eléctrica y formamos un bucle, el campo magnético quedará como vemos en el dibujo de la derecha. De hecho será un campo del tipo dipolo ya conocido.

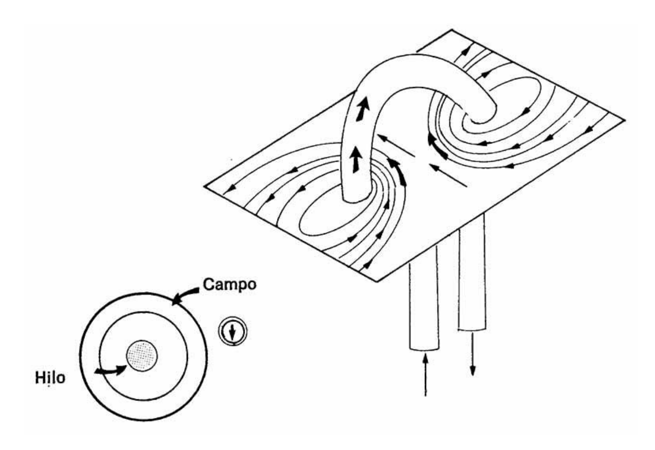


Fig. 51

El hecho de que un bucle de hilo que transporta una corriente eléctrica pueda producir un campo dipolar significa que el bucle puede considerarse en realidad como un imán simple con los habituales polos norte y sur. Esto tiene dos importantes consecuencias prácticas, como veremos pronto, pero lo dicho tiene todavía una importancia mayor en nuestro intento de llegar a una comprensión profunda del magnetismo. El motivo de ello quedará claro si imaginamos el átomo simple de la figura 52. Como todos sabemos, el átomo está formado por un pequeño núcleo rodeado por electrones orbitando a su alrededor. Para simplificar, consideraremos un átomo con un solo electrón, pero nuestras conclusiones pueden ampliarse a átomos más complicados. Lo importante es lo siguiente: un electrón que gira alrededor del núcleo *es* un bucle de corriente. La mejor manera de entenderlo es volver de nuevo a un hilo normal por donde pasa una corriente eléctrica. Si lo miramos con suficiente detenimiento veremos muchos millones de electrones corriendo a lo largo del hilo, chocando con los átomos y produciendo todos los efectos que sabemos produce la corriente eléctrica. Si empezamos a cortar la corriente, lo único que vemos es una disminución en el número de electrones en movimiento. Si llevamos este proceso hasta su conclusión lógica, tendremos una corriente formada por un único electrón. Esto es precisamente lo que hay en un átomo.

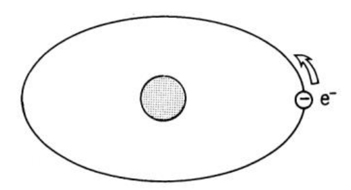


Fig. 52

O sea, que cada átomo en cuanto a sus efectos magnéticos puede considerarse como un diminuto imán, y un conjunto de átomos se nos presentará en general como un conjunto de pequeños imanes con orientaciones casuales.

Esto es todo lo que necesitamos en realidad para comprender el magnetismo. Imaginemos que ponemos una brújula diminuta cerca de un átomo solo, como vemos a la izquierda de la figura 53. La brújula se alineará con el campo magnético producido por este átomo. Imaginemos luego que añadimos un segundo átomo, como vemos a la derecha de la figura 53. La aguja de la brújula se orientará ahora para reflejar la influencia de los dos átomos. Decimos técnicamente que la aguja señala la dirección de la suma de los dos campos magnéticos atómicos. En general, la orientación del segundo átomo en relación al primero será completamente casual, por lo que el campo magnético compuesto captado por la brújula tanto puede haber aumentado como haber disminuido por la presencia del segundo átomo. Si ahora añadimos los miles de millones de átomos cuyos campos magnéticos podrían influir lógicamente sobre nuestra brújula en un material real, no resulta difícil deducir que la suma de tantos campos magnéticos orientados al azar tenderá a difuminarlo todo, y a la brújula no le quedará campo magnético que detectar, o apenas. Esto es lo que sucede exactamente en la mayoría de materiales.

Sin embargo, en unos pocos materiales hay otra propiedad que adquiere importancia. Existen en estos materiales fuerzas que tienden a alinear a los átomos, de modo que los imanes magnéticos en lugar de quedar orientados casualmente en el espacio, acaban todos señalando en la misma dirección. En estos materiales las desviaciones de la brújula debidas a cada átomo, en lugar de contrarrestar mutuamente como en el último ejemplo, se combinan

y producen un único campo magnético muy fuerte. El intenso campo magnético que encontramos alrededor de un imán ordinario se debe al efecto acumulado de los imanes atómicos que están alineados en su interior.

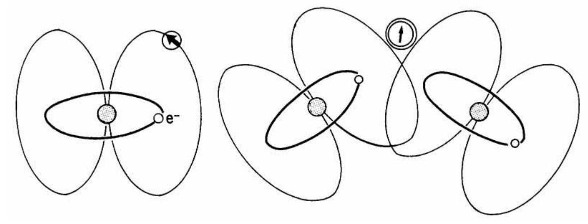


Fig. 53

Una vez dicho esto conviene formular algunas advertencias. En primer lugar, la fuerza que obliga a los imanes atómicos del hierro a alinearse no es magnética en sí. Se debe a la acción de otras fuerzas entre los átomos, fuerzas que son mucho más intensas que la fuerza magnética que existe a nivel atómico. Parece que la existencia o ausencia de esta fuerza en un material dado depende precisamente del modo exacto de formación del material. Para que pueda producirse la alineación, ha de haber una cierta cantidad de espacio libre entre los átomos de un sólido. Si hay demasiado espacio o demasiado poco la alineación desaparece. Esto explica que para hacer imanes permanentes sólo puedan utilizarse unos pocos elementos: el hierro, el cobalto, el níquel y algunos compuestos de estos elementos.

El segundo problema de nuestra explicación es que de ella parece deducirse que todos los dipolos atómicos en un fragmento de material magnético deben señalar en la misma dirección. En realidad, el proceso de alineación tiene lugar a una escala mucho menor. Si pudiésemos observar el interior de un trozo de hierro, veríamos que hay diminutos volúmenes (del tamaño aproximado de un grano de arena) en los que todos los átomos están alineados. Estos volúmenes se llaman dominios. Los dipolos de un dominio dado pueden señalar en una dirección, los dipolos del siguiente dominio pueden señalar en otra dirección, de modo que, en general, la alineación de dos volúmenes vecinos no será la misma.

El hecho de que se formen dominios en un trozo de hierro se debe a que todo sistema en la naturaleza tiende hacia el estado de menor energía posi-

ble (v. cap. 3). Supongamos que tenemos un trozo de hierro con N dominios. Si conocemos la energía de este sistema podemos preguntamos qué sucede con la energía de un estado con un dominio más: ¿es mayor o menor? Si es menor, el sistema evolucionará hacia un estado con N + 1 dominios. Si es mayor el sistema permanecerá tal cual.

Para crear un dominio adicional se necesitan dos procesos que consumen energía. Debemos ordenar los átomos para crear el dominio, y debemos agregar energía al campo magnético producido por el conjunto total de dominios. Si tenemos un número pequeño de dominios, la energía de creación queda minimizada, pero como sólo hay unos pocos campos magnéticos para anularse mutuamente, la energía del campo será grande. Y a la inversa: si creamos un gran número de dominios los efectos magnéticos tenderán a anularse, lo que significa que la energía total en el campo es pequeña, pero tenemos que gastar gran cantidad de energía para crear de entrada los dominios. Está claro que habrá un número óptimo de dominios con el cual el compromiso entre estos dos efectos minimiza la energía total, y éste es el estado hacia el cual evolucionará el sistema.

La conclusión que sacamos de esta discusión está indicada en la figura 54. En un trozo normal, no magnético, de hierro, los dominios señalan hacia direcciones casuales. Si recurrimos a argumentos similares a los aplicados al caso de átomos individuales alineados al azar, podemos demostrar que el campo magnético debido a todos los dominios orientados al azar será casi cero. Por lo tanto, un trozo normal de hierro no será un imán. Sin embargo, si sucede algo capaz de alinear todos los dominios, como vemos a la derecha de la figura 54, quien esté situado fuera del material verá un intenso campo magnético y llegará a la conclusión de que la muestra es realmente un imán permanente.

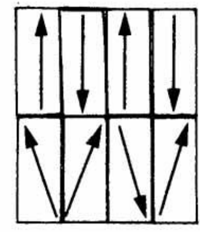
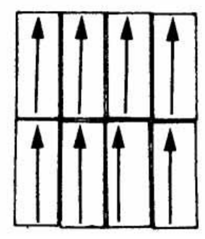
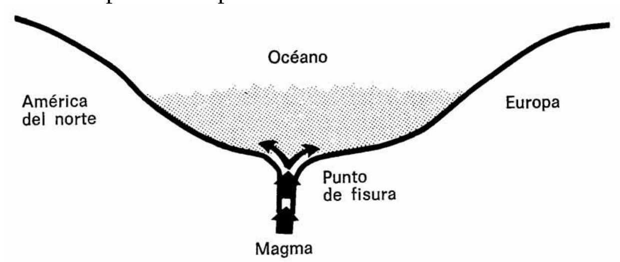



Fig. 54

Por lo tanto, el proceso de magnetización precisa dos pasos. En el primero las fuerzas interatómicas actúan formando los dominios y alineando los dipolos atómicos dentro de cada uno de ellos. Luego algún otro factor actúa alineando los dominios y creando un imán. Cuando frotamos un clavo con un imán y el clavo se convierte en un segundo imán, lo que hacemos es alinear los dominios en el hierro del clavo. Si calentamos el clavo, la energía proporcionada por la llama desordena la alineación que antes hemos inducido y el resultado final es de nuevo un clavo corriente, sin ninguna propiedad magnética.

La relación entre el calentamiento y el alineamiento atómico jugó un papel importante en uno de los descubrimientos más importantes de la geología del siglo XX: el concepto de la deriva continental. La idea de que los continentes flotan y se desplazan sobre la Tierra se había formulado ya desde los años 1920, pero, en general, se había rechazado por falta de pruebas. En tiempos más recientes, pruebas de tipo magnético han proporcionado una base sorprendente para la teoría de la deriva continental.



Fíg. 55

Si Europa y América del Norte están realmente alejándose una de otra, como propone la teoría, ha de haber alguna fisura en medio del Océano Atlántico donde la corteza terrestre se abra y deje salir a la superficie magma caliente del interior (v. fig. 55). El material ascendente sale en fusión, pero al cabo de un tiempo se enfría y solidifica. Los átomos y moléculas de un líquido pueden moverse libremente, por lo que no es de esperar que los imanes atómicos estén alineados cuando el magma sale por primera vez a la superficie. En este sentido el magma es como el clavo calentado del ejemplo anterior y sólo presenta propiedades magnéticas cuando se en-

fría. Si un material magnético se solidifica en presencia de un campo magnético exterior, los imanes atómicos tienden a alinearse con este campo. En el caso del magma ascendente, sus átomos deberían tender a alinearse en la dirección del campo magnético de la Tierra.

Es un hecho muy comprobado (aunque no muy bien entendido) que el campo magnético de la Tierra cambia de sentido a intervalos irregulares, de modo que en algunos períodos del pasado una brújula habría señalado el sur en vez del norte. Si los continentes se están realmente separando y abriendo entre sí el fondo del océano, la alineación magnética de los materiales cerca de la fisura centrooceánica se parecerá a lo dibujado en la figura 56. Mirando desde arriba el fondo del océano, veremos que la roca más cercana a la fisura (es decir, el material que ha llegado más recientemente a la superficie) tiene una magnetización dirigida hacia el actual Polo Norte. A medida que nos alejamos de la fisura captaremos de repente un cambio en la dirección del magnetismo. La roca en la que la magnetización señala hacia el sur debe de haberse solidificado antes de la última inversión del campo terrestre, hace 700.000 años. Si nos alejamos todavía más de la fisura veremos otra inversión. La magnetización señalará de nuevo hacia el norte, y así sucesivamente. La forma característica de estas bandas de dirección alternada sólo puede deberse a la separación de los continentes en un entorno de campo magnético alternado.

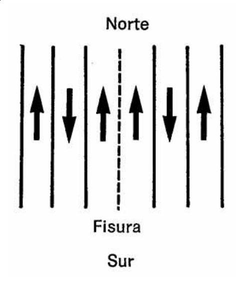


Fig. 56

La idea del magnetismo atómico nos permite ya responder a la pregunta que figura en el título de este capítulo. Una moneda no se pega a un imán porque las monedas suelen estar hechas de cobre. El espacio existente entre

los átomos del cobre metálico no es el preciso y exacto para formar dominios, de modo que si bien cada átomo de cobre continúa siendo un pequeño imán, no hay un magnetismo en gran escala asociado con su orientación. Por lo tanto, no hay interacción importante entre el campo de un imán y una moneda, y la fuerza de la gravedad retiene la moneda en la mesa.

Quizás el aspecto más intrigante de esta respuesta es la idea de que *tocios* los imanes, tanto naturales como sintéticos, existen gracias al movimiento en algún lugar de un electrón. Tratándose de un imán natural los efectos magnéticos se deben a los electrones que giran alrededor de los núcleos de los átomos (aunque esto exija el paso intermedio de la creación de dominios). En muchas aplicaciones usuales se utiliza otro aparato magnético, el electroimán, pero con él también es válido el mismo principio. Un electroimán es como el bucle de hilo que hemos visto antes. Cuando circula una corriente eléctrica, el bucle produce el mismo campo que un imán dipolar, pero con la ventaja adicional de que la fuerza del imán puede controlarse ajustando la corriente. También en este caso la fuente del magnetismo es un conjunto de electrones moviéndose por el hilo.

Se piensa que incluso los campos magnéticos de gran escala, como los presentes en la Tierra y el Sol, tienen su origen en cargas en movimiento. Se supone, por ejemplo, que la existencia del campo magnético terrestre está íntimamente relacionada con el hecho de que una parte del núcleo de la Tierra es de hierro líquido que puede desplazarse y girar. Podemos considerar esta parte como una especie de bucle de corriente, aunque las inversiones periódicas del campo terrestre indican que la descripción correcta del magnetismo de la Tierra debe ser más complicada que una simple correspondencia entre un bucle y un imán dipolar. Hay gran cantidad de trabajos teóricos sobre este problema, pero todavía no comprendemos de modo totalmente satisfactorio los detalles de la generación del campo, a pesar de conocer sus rasgos esenciales.

El hecho de que todo campo magnético derive de una carga eléctrica en movimiento señala uno de los grandes misterios de la física moderna. Hay un nivel elevado de simetría entre los efectos eléctricos y magnéticos en la naturaleza. Los fenómenos puramente eléctricos, como las cargas en movimiento, pueden dar origen a campos magnéticos. Cuando los físicos observan este tipo de simetría en la naturaleza, se sienten muy inclinados a creer

que la simetría debería se completa, que *todo* efecto eléctrico debería tener su correspondiente efecto magnético y viceversa.

Pero hay un aspecto de esta simetría hipotética que deja simplemente de cumplirse. Encontramos en la naturaleza objetos como el electrón que pueden en sí mismos y por sí mismos ejercer fuerzas eléctricas. Estas fuerzas eléctricas son completamente independientes de cualquier efecto magnético. En este punto la simetría entre electricidad y magnetismo deja de cumplirse, porque, como ya hemos visto, *todos* los efectos magnéticos son debidos a corrientes eléctricas. No hay un equivalente magnético de la carga eléctrica.

La idea de que la naturaleza pueda ser casi simétrica pero no del todo, es un anatema para la mayoría de físicos teóricos. Nuestra experiencia nos hace suponer que toda nueva teoría fundamental ha de ser estéticamente agradable además de correcta. Sin duda, el hecho de que esto haya sido cierto en el pasado no garantiza que deba serlo también en el futuro, pero crea una fuerte motivación para buscar los elementos que faltan en el cuadro actual y que si se encontraran darían exactamente la simetría que esperamos.

Todos los efectos magnéticos que hemos discutido hasta ahora se refieren al dipolo magnético. Todos los campos magnéticos que conocemos derivan en último extremo de imanes que tienen un polo norte y un polo sur. Una «carga» magnética correspondería a un imán con un solo polo, que por ello recibe normalmente el nombre de «monopolo magnético». Cuando los físicos formulan la conclusión de que los efectos magnéticos en la naturaleza se deben a corrientes eléctricas es como si dijeran también que los monopolos magnéticos no existen. De hecho las dos maneras de hablar son lógicamente equivalentes y se corresponden entre sí.

Por lo tanto, la búsqueda de la belleza y de la simetría en la naturaleza se reduce a la búsqueda de un polo magnético aislado. Hasta hace muy poco, el motivo primario de esta búsqueda dependía de argumentos «filosóficos» como los citados. Más recientemente, científicos trabajando en las teorías del campo unificado (v. cap. 12) han descubierto que muchas versiones de estas teorías parecen predecir la existencia de monopolos. Como es lógico esto constituye un nuevo estímulo para seguir buscando.

Los experimentos que se han llevado a cabo en este terreno pueden dividirse en dos categorías: las búsquedas directas y las búsquedas geológicas. En las búsquedas directas se apunta un rayo de partículas de alta energía (procedente de un acelerador o de los rayos cósmicos) para que choque contra un blanco y luego se examinan los restos de la colisión, con la esperanza de que una parte de la energía del proyectil se haya convertido en la masa precisa para formar un monopolo magnético. Estos experimentos se llevan a cabo de modo rutinario siempre que se inaugura un nuevo acelerador confiando en que se obtenga algo, pero hasta ahora todos han fracasado. Una variante de este método se basa en examinar los rayos cósmicos que caen sobre la Tierra para ver si alguno de ellos es un monopolo magnético. Esto tiene la ventaja de que no es preciso crear las partículas antes de su detección, sino que se intentan ver los monopolos magnéticos creados en distantes supernovas o los que han quedado de la Gran Explosión.

La búsqueda de tipo geológico se basa en la suposición de que si se han creado alguna vez monopolos en algún lugar y han llegado al Sistema Solar, los que chocaron contra la Tierra o la Luna quedaron atrapados en los campos magnéticos atómicos de las rocas cercanas a la superficie. Aunque el número de monopolos que choque contra la Tierra cada año sea pequeño, en los miles de millones de años transcurridos desde que la Tierra existe se habrá acumulado una gran cantidad de ellos en el material de la superficie. Se han examinado a este respecto sin resultados positivos bloques de hielo de los Polos Norte y Sur de la Tierra, rocas lunares y otros materiales.

El 14 de febrero de 1982, un domingo día de San Valentín, el físico de Stanford, Blas Cabrera registró quizá la primera prueba experimental de la existencia de polos magnéticos. Utilizando un método de detección radicalmente nuevo, midió un acontecimiento que muy probablemente fue el paso de un monopolo de rayos cósmicos a través de su aparato. Su experimento todavía está sujeto a cierta discusión y hasta el momento de escribir este libro no se han detectado más monopolos, pero el interés por los monopolos magnéticos entre los físicos ha aumentado significativamente en el último año. Si se demuestra que Cabrera tiene razón, se habrá demostrado que a veces es importante que los científicos confíen en su intuición sobre la belleza y la simetría inherentes de la naturaleza y que esperen hasta que el experimento adecuado justifique su fe.

VII. EL TERMÓMETRO Y EL ÁTOMO

El uso diario ha convertido en algo familiar para todos el concepto de temperatura. La temperatura forma parte de nuestras vidas, tanto si escuchamos la información del tiempo, como si giramos el botón de un homo o visitamos al médico. Pero si se nos obliga a ir más allá de esta fácil identificación y se nos pide que demos una definición precisa de la temperatura, nos encontraremos con un problema difícil. En primer lugar debemos encontrar un sistema para asignar numerosa diferentes entornos que según decimos están a diferentes temperaturas, determinando de algún modo que un entorno está más caliente que el otro. Después de esto debemos comprender fundamentalmente qué es la temperatura, en lugar de limitamos a atribuirle un número. Sabemos ya que el calor está relacionado con el movimiento de los átomos (v. cap. 1), por lo tanto sería de esperar que la búsqueda de la definición básica de temperatura nos condujera al mundo microscópico.

Uno de los aspectos más sorprendentes de la historia de nuestras ideas sobre la temperatura es la falta completa hasta épocas muy recientes de un método cuantitativo para captarla. Sabemos que los griegos habían desarrollado algunas nociones básicas sobre la ciencia del calor. Herón de Alejandría creó el primer modelo funcional de un motor de vapor, aunque era más un juguete que una herramienta práctica. Es evidente que los griegos tenían las mismas sensaciones que nosotros en los días de calor, y que el tiempo atmosférico era tan importante para ellos como para nosotros, sin embargo no disponían de un método cuantitativo para saber exactamente lo caliente (o lo frío) que era un día dado.

De hecho el primer termómetro no se construyó hasta el siglo XVII. Galileo es recordado hoy en día por sus contribuciones a la ciencia de la mecánica y de la astronomía, y quizá menos justificadamente, por su proceso por herejía. Ya no es tan conocido el hecho de que dedicara buena parte de su tiempo a aplicar su considerable talento a la creación de aparatos prácticos. Una prueba de su talento a este respecto es que su invención de

uno de los primeros termómetros en 1602 sólo es citada en algunas pocas y muy detalladas biografías.

La figura 57 presenta un esquema del termómetro de Galileo. Estaba formado por un tubo estrecho de cristal de unos 55 centímetros de largo, cerrado por un extremo, y por una redoma con agua coloreada. Para tomar una lectura hay que sacar el tubo de cristal del aparato y aguantarlo en la mano para calentarlo. Cuando el cristal ya está caliente, se devuelve a la redoma. Entonces el cristal se enfría de nuevo a la temperatura ambiente, el aire de su interior se contrae y el agua sube por dentro del tubo. La altura alcanzada es una medida de la temperatura ambiente.

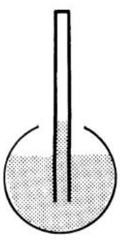


Fig. 57

Comprendemos en seguida que este termómetro no es muy bueno. La altura que alcanza el agua dentro del tubo depende en realidad de dos cosas: del volumen de aire atrapado en su interior, que depende de la temperatura, y de la presión atmosférica que pesa sobre el agua de la redoma y equilibra la fuerza ejercida por la gravedad sobre el agua del tubo. Por lo tanto, el termómetro de Galileo mostraba un cambio de temperatura cuando el aire de su alrededor se calentaba, pero también indicaba un cambio si la presión atmosférica cambiaba, como sucede regularmente cuando se desplazan los sistemas atmosféricos. Este intento de cuantificar la idea de temperatura produjo algo que se parecía más a un barómetro que a un termómetro moderno.

Sin embargo, este primer diseño proporcionó una base para sucesivas mejoras. El primer termómetro con todo el aparato —el tubo más la redoma— situado dentro de un recipiente estanco de cristal para eliminar los efectos de la presión atmosférica apareció en 1653 y su uso general fue impulsado por el duque Femando II de la Toscana. Hacia 1670 se creó el

termómetro de mercurio en su forma más o menos actual. A fines del siglo XVI se fabricaban ya los termómetros sencillos que utilizamos ahora para medir la temperatura del cuerpo y para seguir el curso del tiempo delante de la puerta de nuestra casa.

Los tipos de termómetro que hemos descrito (y desde luego todos los demás tipos) no miden directamente la cantidad que llamamos temperatura, sino alguna cantidad que sabemos que varía cuando se inyecta o se extrae calor de un material. Por ejemplo, en el familiar termómetro de mercurio, utilizamos el hecho de que al calentarse un material se expande y aumenta de volumen. Quien haya visto un cazo de leche hervir sobre el fogón conoce bien el fenómeno. El mercurio está confinado dentro de un tubo de cristal, y el único medio que tiene para expandirse es subir por el tubo, formando la línea plateada cuyo extremo superior corresponde a la temperatura.

Una vez establecido el principio del buen termómetro, la siguiente tarea para los investigadores fue crear una escala de temperaturas: un sistema para asignar números a las lecturas de los termómetros. En el siglo XVII los fabricantes de instrumentos solían pegar cuentas de cristal a intervalos regulares a lo largo de los tubos de los termómetros para ahorrar a los usuarios la molestia de medir la altura del fluido con una regla. Esto supuso indudablemente una mejora sobre sistemas anteriores, pero la situación continuó siendo poco clara porque la temperatura leída dependía del instrumento concreto que se utilizaba.

Quizá la mejor manera de comprender el problema planteado sea imaginar a dos investigadores de dos laboratorios diferentes midiendo una determinada reacción química, y luego comparando sus notas. Supongamos que descubren que las temperaturas medidas no son idénticas. ¿Se debe esto a que sus experimentos eran diferentes o a que utilizaban termómetros distintos? Si no se ponen primero de acuerdo sobre los números asignados a una escala de temperaturas, no podrán responder a la pregunta anterior. Peor todavía: aunque se pongan de acuerdo sobre la temperatura medida siempre hay la posibilidad de que las reacciones tuvieron lugar a temperaturas diferentes, y de que la diferencia quedó compensada por las diferencias existentes entre sus termómetros.

Por lo tanto, incluso una operación tan simple como comparar experimentos realizados en lugares diferentes con instrumentos diferentes exige fijar primero una escala de temperaturas. Un método consiste en definir dos

situaciones fácilmente reproducibles —las que se suelen escoger en la práctica moderna son los puntos de congelación y de ebullición del agua—, y luego definir un grado de temperatura como una cierta fracción de la diferencia entre las alturas de la columna de mercurio en las dos situaciones escogidas.

El primer intento de establecer una escala universal de este tipo corrió a cargo, en 1701, del astrónomo danés Olaus Roemer. Roemer pensó que todas las lecturas de temperatura tenían que ser números positivos y por ello asignó el grado cero de temperatura a la mezcla más fría que pudo producir en el laboratorio (una mezcla de sal y agua congelada). Llamó al punto de ebullición del agua 60 grados, resultando estar entonces el punto de congelación del agua a 7,5 grados. (Al parecer le interesaba que una octava parte de su escala de temperaturas estuviera debajo del punto de congelación.)

Hacia la misma época un fabricante de instrumentos de Amsterdam, Daniel Gabriel Fahrenheit, se interesó por la construcción de termómetros. El invento de la conocida escala Fahrenheit de temperatura es una de las cosas divertidas que a menudo se dejan de lado en la historia de la ciencia porque demuestran que los científicos pueden equivocarse como cualquier otro mortal.

Fahrenheit estaba enterado de los trabajos de Roemer y empezó adaptando aquella escala a su propio negocio de fabricación de instrumentos. Roemer al describir su temperatura patrón superior utilizó la palabra alemana *blutwarm,* que podría traducirse por *caliente como la sangre*. Roemer utilizaba esta palabra en el sentido de muy caliente, pero Fahrenheit pensó que se refería a la temperatura del cuerpo humano. En consecuencia cuando empezó a elaborar su propia escala de temperaturas, escogió una escala basada en la temperatura del cuerpo humano (a la que asignó 22,5 grados) y en la del hielo en fusión (7,5 grados). Pronto se dio cuenta de que estos números no eran muy fáciles de usar, y en 1717 los cambió a 96 y 32 grados respectivamente, «para evitar fracciones inconvenientes e inoportunas».

Fahrenheit midió mediante esta escala el punto de ebullición del agua y vio que era de 212 grados, y publicó su resultado. Cuando empezó a adoptarse su escala se comprobó que era mucho más fácil calibrar los termómetros utilizando como patrones la congelación y la ebullición del agua, en lugar de la temperatura del cuerpo humano. Por desgracia la medición que

hizo Fahrenheit del punto de ebullición del agua estaba equivocada. Cuando se dispuso de mejores termómetros se descubrió que si se definía el punto de ebullición del agua en 212 grados y el de congelación en 32 grados, la temperatura del cuerpo humano es de 98,6 grados, no 96.

¿Cómo pudo cometer Fahrenheit un error así? La respuesta a esta pregunta ilustra un hecho importante de la naturaleza de la ciencia, y vale la pena considerarla con más detalle. Como ya hemos dicho, los primeros termómetros se basaban en el hecho de que los materiales se expanden de modo uniforme cuando se calientan. Por ejemplo, si un cambio de temperatura de 10 grados provoca un determinado aumento del volumen de un material, un cambio de 20 grados provocará un aumento doble. Si recordamos un termómetro de mercurio, y suponemos que el diámetro del tubo de cristal es exactamente el mismo en toda su longitud, como vemos en el termómetro de la izquierda de la figura 58, estos cambios uniformes de volumen se traducirán en cambios uniformes en la altura de la columna de mercurio. Por esto las marcas de los grados en un termómetro están espaciadas uniformemente. Sin embargo, si el tubo de cristal no tiene un diámetro uniforme, esto no será cierto. A la derecha de la figura 58 vemos un caso exagerado de no uniformidad. Es evidente que cambios iguales en el volumen total del mercurio producirán cambios desiguales en la altura de la columna, porque se necesita un volumen mayor de mercurio para producir cambios iguales de altura a medida que subimos por el tubo.

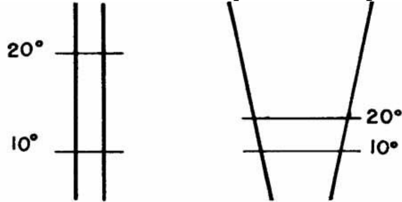


Fig. 58

Probablemente ésta fue la causa de la dificultad de Fahrenheit. Vivía en una época en la que simplemente no era posible producir técnicamente un tubo de cristal de calibre uniforme que sirviera de termómetro preciso. La lección que podemos extraer de este incidente histórico es que muy a menudo el progreso de la ciencia depende de nuestra capacidad de llevar a cabo tareas que de entrada parecen bastas y poco importantes. Ignoramos

quién fue la primera persona que ideó un sistema para fabricar un tubo de cristal de diámetro uniforme desde un extremo al otro. Probablemente este logro no se debió a ninguna persona en concreto sino a los esfuerzos acumulados de muchos artesanos que trabajaban esforzadamente en el anonimato. Sin embargo, sin su trabajo habría sido imposible establecer escalas de temperatura fiables, y la ciencia de la termodinámica, una de las piedras angulares de la física moderna, no hubiera podido desarrollarse. Parece, por lo tanto, que la ciencia es más un partido de fútbol que un match de tenis. Las superestrellas son importantes, y son las personas más visibles. Pero incluso el mejor goleador no llegaría muy lejos sin la ayuda de sus compañeros de equipo que le pasan la pelota. En la ciencia, como en el fútbol quienes no marcan goles raramente se hacen populares.

La escala de temperaturas Fahrenheit a pesar de sus primeras dificultades se extendió ampliamente y todavía se utiliza de modo corriente en Norteamérica. En 1742 el astrónomo sueco Anders Celsius propuso que el intervalo entre los puntos de congelación y de ebullición del agua abarcara sólo 100 grados. Es un hecho histórico poco conocido que al principio «puso la escala de temperaturas cabeza abajo» dando 0 grados a la ebullición y 100 grados a la congelación, pero otros pusieron las cosas rápidamente en su lugar y presentaron la conocida escala Celsius, o centígrada. Esta escala se utiliza en la mayor parte del mundo y se asocia generalmente con el sistema métrico.

Sin embargo, la historia de los sistemas Fahrenheit y Celsius tiene que dejar algo bien claro. No existe una escala de temperaturas «correcta» o «justa». Cada paso en el desarrollo de una escala es totalmente arbitrario, pues supone una elección basada más en la conveniencia que en cualquier principio científico superior. Es razonable que se utilizara el agua para fijar los dos extremos de las escalas que utilizamos hoy en día, porque el agua es una sustancia muy disponible. Pero, en principio, no hay motivo para que el intervalo entre la ebullición y la congelación no pueda ser de 1.000 grados en vez de 100 o de 180. Del mismo modo tampoco hay razón que prohíba utilizar otras sustancias aparte del agua para definir la escala. ¿Por qué no utilizamos los puntos de ebullición y de fusión del hierro, por ejemplo? Me han contado que algunas viejas destilerías de Europa utilizaron hasta después de la II Guerra Mundial una escala basada en los puntos de ebullición y de congelación del alcohol.

Es posible indicar que en muchos casos la escala Fahrenheit está mucho más adaptada al uso cotidiano que la Celsius. En primer lugar, el grado Fahrenheit tiene un tamaño casi la mitad del grado centígrado, lo que significa que utilizando la escala Fahrenheit es posible dar temperaturas con una precisión mayor sin recurrir a los decimales. Esto resulta especialmente ventajoso en las previsiones meteorológicas en las que se suelen dar cifras de temperatura en números enteros. Y la escala Fahrenheit a pesar de su historia accidentada está mucho mejor adaptada psicológicamente para las indicaciones meteorológicas (donde la gente más utiliza la temperatura en su vida normal) que la de Celsius. Las situaciones en las que el número de cifras de una cantidad cambia tienen una significación especial casi mágica. La sensación que da un millón de dólares parece más exuberante que la de 900.000 dólares. Del mismo modo cuando la temperatura alcanza los 100 grados Fahrenheit la idea de calor entra de modo más espectacular que si decimos que estamos a 37,7 grados centígrados. La escala Fahrenheit, como sucede con tanta frecuencia con el sistema inglés de medidas, está adaptada al ser humano. Por este y por otros motivos pienso que la actual campaña de conversión a las unidades métricas en Estados Unidos está equivocada, por no decir más.

En todo caso el establecimiento de escalas universalmente aceptadas elimina parte de la arbitrariedad en la medición de la temperatura. Ahora si dos laboratorios diferentes realizan el mismo experimento y obtienen resultados diferentes para una temperatura, sabemos por lo menos que la diferencia es real. Pero las escalas Fahrenheit y centígrada que hemos definido hasta ahora no son *realmente* universales, y esto por motivos más profundos. Aunque los dos extremos de la escala de temperaturas estén definidos sin ambigüedad, la medición de cualquier temperatura intermedia depende de las propiedades expansivas del material usado concretamente.

En general, la expansión que experimenta un material cuando su temperatura cambia un grado depende ligeramente de la temperatura del material antes de calentarlo. Por ejemplo, una barra de hierro de treinta centímetros de longitud a temperatura ambiente (20°C) se alargará 0,036 milímetros si se eleva la temperatura un grado C mientras que la misma barra en el punto de ebullición del agua se alargará 0,041 milímetros. Las irregularidades de este tipo son distintas para distintos materiales, por lo tanto,

cualquier escala de temperaturas definida mediante la expansión de un material dado dependerá de las propiedades detalladas de este material. Esto no debería suceder con una escala realmente universal.

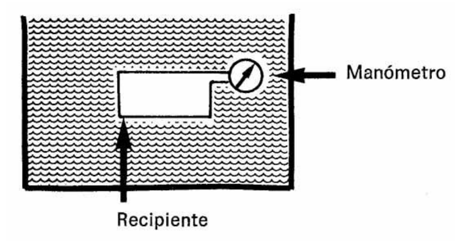


Fig. 59

Una manera de definir la temperatura sin referirse a un material concreto consiste en utilizar un aparato llamado termómetro de gas de volumen constante. La figura 59 muestra un esquema simplificado de este aparato. No es más que un recipiente lleno de gas de paredes rígidas conectado a un manómetro que mide la presión del gas. El volumen del recipiente no cambia (por esto se llama termómetro de *volumen constante*), por lo tanto, la presión será diferente si se coloca el termómetro en ambientes diferentes. Por ejemplo, si sumergimos el recipiente en un baño de agua y hielo a 0°C tendremos una lectura de presión. Si a continuación ponemos a hervir el agua, la presión subirá a un nuevo valor. Las lecturas del manómetro en estas dos situaciones definirán los dos extremos de las escalas Celsius o Fahrenheit, y la lectura de la presión en cualquier otra situación nos proporcionará una temperatura, exactamente igual que la altura de una columna de mercurio.

Supongamos que con un termómetro' de volumen constante deseáramos medir la temperatura de un baño de agua. Primero sumergiríamos el aparato en una mezcla de hielo y agua y leeríamos la presión del manómetro. Llamemos a esta lectura presión de referencia. Sacaríamos luego el termómetro de este baño y lo pondríamos en el baño cuya temperatura deseamos conocer. El manómetro indicará una nueva presión y el cociente entre esta presión y la presión de referencia dependerá de la diferencia de temperatura entre los dos baños. De este modo podemos convertir las lecturas del manómetro en grados centígrados o Fahrenheit.

Por desgracia, este sistema presenta algunas complicaciones. Supongamos hipotéticamente que hemos llevado a cabo todos los pasos necesarios para medir la temperatura con nuestro termómetro lleno de aire. Extraigamos el aire del recipiente, sustituyámoslo por oxígeno y repitamos todo el proceso. En un mundo perfecto podríamos esperar que las lecturas de la presión fueran las mismas que antes, o sea, que no importaría el gas que tuviéramos dentro del termómetro. Pero, en realidad, no vivimos en un mundo perfecto, como nos recuerdan repetidamente otros autores en contextos distintos. Si en el termómetro hay oxígeno en lugar de aire, tanto la presión de referencia como la presión final (así como el cociente entre ellas) serán diferentes. Si utilizamos un tercer gas (por ejemplo, helio) tendremos un tercer conjunto de lecturas de presión diferente de los dos primeros.

Para acabarlo de arreglar, aunque no cambiemos el aire de la medición original por oxígeno, y sólo saquemos del recipiente algo del aire inicial, ya no se repetirán las lecturas iniciales de presión. En otras palabras, el cambio de presión no sólo depende del tipo de material presente en el termómetro, sino también de la cantidad de material que contiene.

Cierto es que podríamos salvar el obstáculo y definir la escala de temperaturas en función de una cantidad dada de un gas concreto. Por ejemplo, podríamos decir que las lecturas de un termómetro que contiene un kilo de aire son las «correctas» y calibrar todos los demás termómetros de acuerdo con ellas. De hecho, esto es lo que hacemos cuando damos temperaturas en función de un termómetro corriente de mercurio. Pero las situaciones de este tipo molestan a los físicos. Una cantidad fundamental debería tener una definición fundamental y no depender de detalles como los que hemos estado discutiendo.

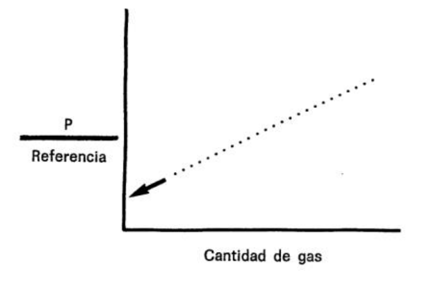


Fig. 60

El hecho de que las lecturas de nuestro termómetro cambien cuando cambia la cantidad de gas sugiere un sistema para resolver este problema. Supongamos que tomamos una serie de lecturas de acuerdo con el sistema antes descrito, y que después de cada conjunto de mediciones extraemos la mitad del gas presente en el recipiente. Cada conjunto de mediciones, como es lógico, diferirá ligeramente de las anteriores. Podemos dibujar una gráfica de esta diferencia representando en función de la cantidad de gas del termómetro el cociente entre la presión del segundo baño y la presión de referencia. Tendremos entonces una serie de puntos como los de la figura 60. A medida que disminuye la cantidad de gas, el cociente entre la presión medida y la de referencia disminuye lentamente. Podemos imaginar que continuamos extrapolando estas lecturas hasta llegar al extremo de la izquierda. ¡El punto en que la extrapolación corta al eje representa el resultado esperado de un experimento hipotético en el que la temperatura se mide con un termómetro que no contiene nada de gas!

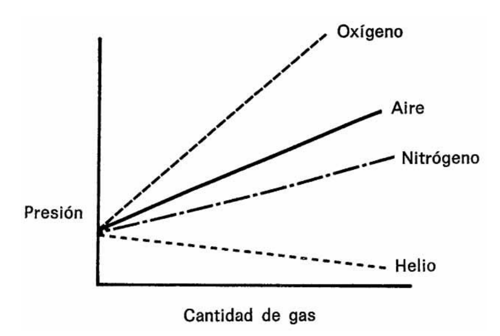


Fig. 61

Si consideramos esta intersección como el límite de un conjunto de lecturas en las que se va reduciendo sucesivamente la cantidad de gas del termómetro, se nos presenta una importante conclusión. Puede ser cierto que la temperatura medida con este termómetro depende del tipo y de la cantidad de gas del recipiente, pero también es razonable suponer que en el límite, cuando el termómetro ya no contiene gas, el tipo de gas concreto que se está extrayendo y que al final ha sido evacuado del todo, no debería afectar la posición del punto extrapolado «sin gas». Volviendo a la figura

60, confiamos que si repetimos la secuencia de experimentos con un termómetro que contiene tipos diferentes de gases, la extrapolación de todos ellos conducirá al mismo punto del eje vertical. Esto es lo que sucede en realidad. La figura 61 muestra el resultado obtenido con diferentes tipos de gas.

Parece, pues, que después de seguir una cadena bastante complicada de razonamientos y experimentos, hemos encontrado un número que puede relacionarse con la temperatura y que no depende de los materiales presentes en el aparato usado para hacer las mediciones. La cantidad que obtenemos al final de estas operaciones se llama temperatura del gas ideal. El camino seguido para llegar a esta nueva escala de temperaturas quizás ha sido complicado, pero el hecho de recorrerlo ha hecho posible que aprendiéramos varias lecciones importantes.

En primer lugar, es evidente que los físicos están dispuestos a dedicar grandes esfuerzos para idear patrones universales que sean independientes de los detalles de la medición. Esto se debe en parte a motivos de índole práctica; si uno dispone de una escala de temperaturas basada en el gas ideal no le importa mucho que el oxígeno de su termómetro esté ligeramente contaminado con nitrógeno. A pesar de ello podrá continuar comparando sus resultados con los obtenidos en otros laboratorios. Pero el motivo con mucho más importante no es práctico, sino estético. Es que no parece correcto que una escala de temperaturas dependa del material del termómetro, y estoy seguro de que los físicos del siglo XIX habrían continuado buscando con igual avidez la escala del gas ideal aunque su consecución no trajera consigo ninguna ventaja práctica. La búsqueda de la universalidad es un gran estímulo en todos los dominios de la física.

En segundo lugar, el hecho de que fuera tan difícil idear una escala de temperaturas adecuadas refleja el hecho de que todavía estamos trabajando en la oscuridad; podemos definir un sistema para medir temperaturas, pero en realidad todavía no sabemos realmente qué es. Hasta que no dispongamos de este conocimiento, no habrá que extrañarse demasiado de que nuestros intentos por tratar el problema de la temperatura resulten algo toscos.

Finalmente, una vez conseguida una escala de temperaturas universalmente aceptada, podemos observar nuevos e interesantes fenómenos. Por ejemplo, podemos coger un termómetro de gas y repetir el sistema de medición descrito aplicándolo a una sucesión de situaciones de temperatura

cada vez más baja. Podemos empezar con vapor de agua e ir bajando hasta el alcohol hirviendo, luego hasta el hielo seco, el nitrógeno líquido y el helio líquido. Si hacemos esto y representamos los resultados obtendremos una gráfica como la de la figura 62. El cociente de presiones en el límite sin gas irá bajando a medida que baje la temperatura (medida con la escala convencional centígrada o Fahrenheit). Si prolongáramos la línea recta de la gráfica a temperaturas situadas por debajo del punto de congelación del helio, la línea obtenida alcanzará rápidamente un valor final del cociente de presiones igual a cero.

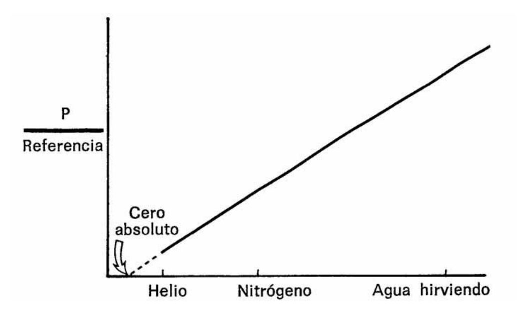


Fig. 62

La presión, por definición, no es más que la fuerza ejercida por el gas sobre cada centímetro cuadrado de la pared del recipiente. Podemos imaginar que la presión de un gas sea cero, pero no que sea negativa: un número negativo sería aquí simplemente absurdo. Esto significa que el punto en que la línea de la gráfica corta a la presión cero representa la menor temperatura posible que puede alcanzarse. Esta temperatura, situada a –273,16°C, tiene una importancia especial. Se llama cero absoluto y aunque, como veremos más tarde, tiene una interpretación simple en función del movimiento molecular, puede definirse sin ninguna referencia directa a los átomos. Se trata realmente de una cantidad fundamental.

Esto significa que el cero absoluto, al contrario de los puntos de congelación y ebullición del agua, *no* es arbitrario si se utiliza para construir una escala de temperaturas. La escala de temperaturas utilizada actualmente por los científicos, la llamada escala Kelvin, tiene el punto de cero grados en el

cero absoluto. Sin embargo, esta escala en lugar de definir un punto superior arbitrario de referencia se limita a definir el grado. Un grado Kelvin (K) se define exactamente igual a un grado centígrado, y por lo tanto, equivale a 9/5 de un grado Fahrenheit.

Después de explicar cómo puede definirse en teoría una escala de temperaturas, quizá convenga detenerse un momento y preguntar cómo se traduce todo esto en la práctica. Al fin y al cabo en la actividad normal de tipo industrial y científica a menudo se quiere medir todo tipo de temperaturas, desde la del cero absoluto hasta las de los puntos de fusión de los metales. Sería muy pesado calibrar los termómetros con los puntos de ebullición y de congelación del agua si luego han de utilizarse en situaciones mucho más calientes o mucho más frías. Por ello, en 1968, se adoptó la Escala Internacional Práctica de Temperaturas. Esta escala define un gran número de temperaturas de referencia que pueden reproducirse fácilmente en el laboratorio. Las temperaturas se definen en la escala Kelvin, y van desde el punto en que el hidrógeno se condensa y se transforma en líquido (13,81°K) hasta el punto de fusión del oro (1.337,58°K). De este modo podemos calibrar un termómetro utilizando temperaturas de referencia próximas a las temperaturas en las que trabajará realmente.

Sistema	*Temperatura*
Interior del Sol	10^7
Superficie del Sol	6.000
Punto de fusión del plomo	600
Temperatura ambiente	300
Punto de congelación del agua	273
El oxígeno se licúa	90
El helio se licúa	4,2
La temperatura más baja obtenida en el laboratorio	10^{-6}

Tenemos que discutir todavía otro aspecto práctico de la termometría. La gama de temperaturas existentes en la naturaleza y en el laboratorio es muy grande. En la tabla de la página siguiente ofrecemos algunas temperaturas típicas que podrían encontrarse.

Esta amplia gama de temperaturas exige, de hecho, una capacidad técnica en la construcción de termómetros algo superior a la que hemos descrito hasta ahora. Por ejemplo, por debajo de 1°K el termómetro de gas no trabaja bien porque las presiones gaseosas resultan demasiado bajas para medirse. Del mismo modo, si la temperatura es muy alta, cualquier termómetro del tipo descrito se fundiría.

Podemos idear otros tipos de termómetros siguiendo el sistema general de descubrir propiedades de los materiales que dependan de la temperatura y utilizando luego esta propiedad como una medida de la temperatura.

El calor generado por una corriente eléctrica al pasar por un hilo depende en cierta medida de la temperatura del hilo. Este efecto, con una calibración adecuada, puede utilizarse para medir temperaturas hasta cerca de 1°K, pues debajo de este punto la sensibilidad de este tipo de termómetro de resistencia eléctrica resulta insuficiente. Tiene, sin embargo, la ventaja de que sólo hay que situar una pequeña bobina de hilo en la región cuya temperatura queremos saber y la medición de una corriente eléctrica es una operación sencilla en comparación con el sistema complicado de medición mediante un termómetro de gas.

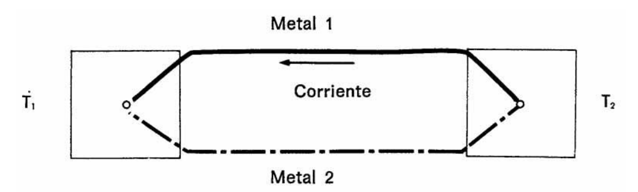


Fig. 63

Si tomamos hilos de dos metales diferentes, soldamos entre sí sus extremos como indica la figura 63 y luego situamos los dos extremos en ambientes de temperatura diferente, circulará por el bucle una corriente eléctrica. La cantidad de corriente depende de la diferencia de temperatura entre los dos extremos, o sea, que si mantenemos, por ejemplo, un extremo en un recipiente con hielo en fusión y agua, al medir esta corriente podremos determinar la temperatura del otro extremo. Este aparato, llamado termopar, se basa en principios demasiado complicados para exponerlos aquí, pero es uno de los aparatos de medición de la temperatura más corrientes, porque puede fabricarse fácilmente. Además, el dato de salida es una corriente

eléctrica, y así resulta ideal para utilizarlo en sistemas donde las temperaturas están controladas por ordenador. Los termopares empiezan a utilizarse con dificultad por debajo de los 50°K, por lo tanto, no suelen aplicarse en la medición de temperaturas muy bajas.

Cuando las temperaturas son inferiores a 1°K pueden utilizarse para hacer mediciones las propiedades magnéticas de la materia. Sabemos (como vimos en el cap. 6) que en muchos átomos el movimiento de los electrones en sus órbitas crea campos magnéticos alrededor del átomo, y que en muchos casos podemos considerar cada átomo como un diminuto imán con un polo norte y un polo sur. El movimiento de los protones y de los neutrones dentro del núcleo produce un efecto similar (aunque más pequeño). Si situamos un trozo de material en un campo magnético, estos pequeños imanes tenderán a alinearse con el campo. El grado de alineación general depende de la temperatura del material, y por lo tanto puede utilizarse como indicación de esta temperatura. Las técnicas que se basan en la alineación de los imanes atómicos pueden medir hasta 0,001°K, y las que se basan en efectos nucleares menores pueden alcanzar temperaturas mil veces inferiores, hasta 0,000 001°K.

En el otro extremo de la escala de temperaturas, determinamos temperaturas muy altas midiendo la radiación con un piròmetro óptico. Sabemos que si calentamos un trozo de metal al principio se pone rojo oscuro, luego rojo brillante y finalmente rojo blanco. Vimos en el capítulo 4 que el color está relacionado con la longitud de onda de la radiación electromagnética, y que esta radiación existe tanto en forma invisible como visible. Podemos medir la intensidad de la radiación emitida por un objeto en varias longitudes de onda (p. ej., observándola primero a través de un filtro azul y luego de un filtro rojo). A partir de estos datos disponemos de fórmulas que nos permiten deducir directamente la temperatura del objeto, del mismo modo que con la vista podemos saber que un objeto al rojo es más frío que otro al blanco.

Después de comprobar que podemos medir temperaturas y de haber discutido los sistemas posibles, podemos volver ahora a la cuestión que nos planteamos al principio: ¿Qué es la temperatura? Para contestarla tenemos que basamos en el hecho de que cualquier material que tiene una temperatura está formado por átomos, y que toda propiedad de este material puede relacionarse de algún modo con el comportamiento de los átomos.

Tomemos, por ejemplo, la presión. Cuando inflamos un neumático tenemos la sensación de que el aire está ejerciendo una fuerza sobre las paredes del neumático, aguantando así el peso del coche. De hecho, podemos definir la presión como la fuerza ejercida por el aire dividida por la superficie del neumático (el área de la cámara). Esta definición será macroscópica y no depende de los átomos.

Sin embargo, si pudiéramos ver la pared del neumático con una especie de supermicroscopio, veríamos que las moléculas de aire están continuamente rebotando sobre ella. Cada vez que una molécula rebota ejerce una fuerza sobre la pared, y el efecto total de todas estas colisiones es lo que percibimos como una presión. Esta descripción microscópica de la presión no está basada en fuerzas a gran escala ni en superficies, pero, en cambio, tiene en cuenta las masas y velocidades de las moléculas y la frecuencia con que las moléculas rebotan sobre la pared.

Es evidente que estas dos descripciones de la presión son complementarias. Representan simplemente dos maneras de ver la misma cosa. Una, la macroscópica, se basa en cantidades a gran escala que podemos captar con nuestros sentidos. La otra, la microscópica, se refiere a propiedades de los átomos que no podemos ver directamente. Desde un punto de vista experimental es mucho más fácil idear una definición macroscópica de cualquier cantidad. Por esto en la historia de la ciencia vino primero este tipo de explicación. Sin embargo, no puede negarse que la descripción de los fenómenos en función del movimiento atómico es más satisfactoria, porque es más básica.

Nuestra discusión de la temperatura es un buen ejemplo de ello. Nos hemos esforzado mucho en definir cantidades como el cero absoluto completamente en función de medidas macroscópicas. Hasta ahora no hemos recurrido al concepto de átomo, y esta limitación de nuestra discusión la convierte en un buen modelo del desarrollo del concepto de temperatura. Pero aunque hemos llegado bastante lejos, todavía no hemos explicado realmente qué es la temperatura. Hemos conseguido dar un rodeo a la cuestión. La raíz del problema es que no hemos ofrecido todavía una definición microscópica de la temperatura.

Si volvemos a nuestro ejemplo de la presión, veremos que necesitamos tres cosas para dar una descripción completa de un fenómeno. Necesitamos,

desde luego, los cuadros microscópico y macroscópico, y luego necesitamos una formulación que conecte los dos cuadros, lo que los filósofos llaman una formulación puente. En el caso de la presión la formulación puente rezaría más o menos así: «La fuerza que calculamos a partir de las colisiones moleculares es la misma fuerza que medimos con un manómetro de neumáticos.»

Quizás esta formulación parezca trivial, pero en realidad toca un tema filosófico muy profundo, el tema de la relación entre el mundo físico y las ideas sobre el mundo que existen en nuestras mentes. A finales del siglo XIX nadie había visto un átomo. Todas las pruebas sobre la existencia de los átomos eran indirectas. La gente creía en los átomos porque ofrecían una explicación simple y elegante de muchos efectos físicos, pero en caso de necesidad debían admitir que la existencia de tales efectos en el mundo no podía demostrarse. Por lo tanto, la división entre las descripciones microscópicas y macroscópicas de la ciencia recuerda en una forma más difícil la vieja distinción filosófica entre el objeto y el pensamiento. La búsqueda de una definición satisfactoria de la temperatura se reduce, por lo tanto, a algo tan difícil como encontrar un puente que salve la distancia entre estos dos mundos.

El desarrollo de una definición microscópica de la temperatura es algo más complicado que el camino esbozado para definir la presión, pero sigue el mismo esquema general. Hemos visto que la escala Kelvin de temperaturas puede definirse en función de la presión registrada por un gas en un termómetro de gas. Si utilizamos la descripción microscópica de la presión para describir este gas, un poco de matemáticas nos conduce a la siguiente ecuación:

$$1/2\ \mathrm{m}v^2 = 3/2\ k\mathrm{T}$$

En el primer término de esta ecuación tenemos la mitad de la masa de una sola molécula de gas multiplicada por el cuadrado de la velocidad media de las moléculas. En el segundo término tenemos la temperatura Kelvin normal, T, multiplicada por un número, *k*, llamado constante de Boltzmann (en honor de Ludwig Boltzmann, el físico austríaco que descubrió esta relación).

La ecuación tiene una interpretación simple. Nos dice que la propiedad que nosotros captamos y medimos como temperatura está relacionada con

la energía contenida en el movimiento de las moléculas. Cuanto más deprisa se mueven las moléculas, más elevada es la temperatura. En el capítulo 1 discutimos las consecuencias de esta idea, pero de momento nos limitamos a comentar que esta interpretación de la ecuación nos proporciona una idea de la temperatura mucho más satisfactoria que todo lo visto hasta ahora. Incluso el concepto del cero absoluto puede interpretarse fácilmente, porque vemos que T = 0 en la ecuación de Boltzmann corresponde al caso de moléculas que no se mueven ($v = 0$). En otras palabras, a medida que desciende la velocidad de las moléculas gaseosas, baja la temperatura que medimos. Pero la velocidad de una molécula no puede ser inferior a cero, porque cuando uno está parado no puede ya moverse más lentamente. En este punto la temperatura es lo más baja posible. (Técnicamente, la mecánica cuántica nos dice que la velocidad más baja que una molécula puede tener no es cero, sino un pequeño número positivo llamado velocidad del punto cero.)

Esta descripción atómica de la temperatura es intelectualmente más satisfactoria que la definición en función de la escala de gases ideales, puesto que proporciona una idea fácil de visualizar. Mayores temperaturas corresponden simplemente a movimientos más rápidos de los átomos. Pero en un nivel más profundo es un resultado realmente notable, porque demuestra en un sentido estrictamente matemático cuál es la relación exacta entre una cantidad macroscópica (la temperatura) y una cantidad microscópica (la velocidad atómica). Proporciona el puente entre el mundo y nuestros esquemas conceptuales sobre él, y como tal disfruta de una posición central en las discusiones de la filosofía de la ciencia.

Al parecer pensando en un concepto tan cotidiano como la temperatura hemos llegado nada menos que al eslabón perdido entre los átomos y nosotros.

VIII. ¿POR QUÉ SALE AIRE CALIENTE DE DEBAJO DEL FRIGORÍFICO A PESAR DE ESTAR FRÍO SU INTERIOR?

La figura 64 muestra las partes esenciales del tipo de frigorífico que probablemente tenemos en nuestras cocinas. En el punto A, un líquido (normalmente refrigerantes de freón) sale a chorro impulsado por una alta presión a través de una tobera y entra en un conducto. El punto de ebullición del líquido a presión normal es de unos 4,3°C, por lo tanto, cuando entra en el conducto empieza a evaporarse, extrayendo calor de su entorno para poder hacerlo. Cualquier cosa situada cerca de los refrigerantes de freón que se están evaporando (p. ej., un tomate en el frigorífico) se enfría.

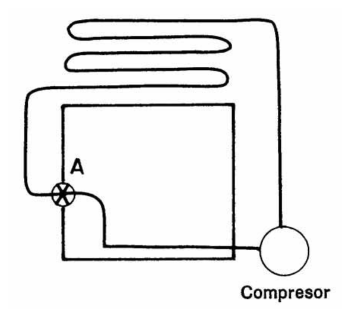


Fig. 64

El vapor de freón pasa luego a un compresor movido a motor donde se le somete a una alta presión. La presión convierte de nuevo el vapor en un líquido, calentándolo todavía más. El líquido caliente pasa luego por una serie de conductos delgados (la rejilla negra de detrás del frigorífico). Aquí el calor es absorbido por el aire. Este líquido enfriado vuelve a la tobera para iniciar de nuevo el proceso, mientras que el aire calentado se hace salir fuera y por esto lo sentimos cuando ponemos la mano debajo del frigorífico.

Por lo tanto, el frigorífico es simplemente un aparato que absorbe calor en un líquido de trabajo y luego traslada este calor al aire. Digamos de paso que si la válvula de expansión del vapor y el serpentín de enfriamiento estuvieran localizados fuera de la casa, en el suelo o en el aire, y el calor se desprendiera dentro de la casa, tendríamos una bomba de calor, un aparato que se ha difundido en esta época ahorradora de energía como un medio eficiente para calentar una casa.

El frigorífico es para el físico un ejemplo más de una máquina que funciona entre ambientes situados a dos temperaturas diferentes. La figura 65 muestra el concepto que un físico tiene de un frigorífico. Hay un depósito de calor a una temperatura alta, $T_{caliente}$, y otro a una temperatura baja $T_{fría}$. Estos depósitos en un frigorífico ordinario son el aire exterior y las cosas que estamos enfriando, respectivamente. Se extrae del depósito frío una cantidad de calor, indicada normalmente por la letra Q y se deposita en el depósito caliente una cantidad Q'. Para conseguirlo se necesita una cantidad de energía E: energía que proporciona la compañía de electricidad. Se necesita esta energía para que funcione el compresor y se desplacen los refrigerantes de freón por el circuito. Todo el calor extraído del depósito frío acaba en el caliente, por lo tanto no hay pérdida de energía en el sistema. Sin embargo, en el comportamiento de un frigorífico hay un aspecto tan evidente que tendemos a pasarlo por alto. *Para que el frigorífico funcione* hay *que enchufarlo.*

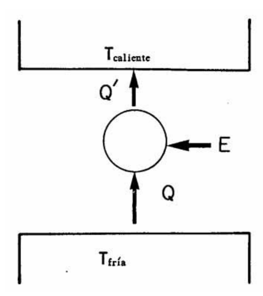


Fig. 65

Éste es un caso especial de una regla que los físicos llaman Segunda Ley de la Termodinámica. Como todas las leyes profundas resulta tan obvia

que la primera reacción al verla es: «Claro. ¿De qué otra manera podría ser?» Sin embargo, las implicaciones de esta regla afectan todos los aspectos de nuestras vidas e incluso nos ofrecen un anticipo de cómo será el fin del Universo. La formulación general de la ley es:

El calor no pasa espontáneamente de un objeto frío a uno caliente.

Quizás un ejemplo nos convencerá del carácter razonable de esta ley. Si dejamos un cubito de hielo en el fregadero, el calor del aire ambiente (un objeto caliente) pasará al cubito (un objeto frío). El resultado final es que el cubito acabará derritiéndose y el agua resultante se pondrá a la temperatura ambiente. Si viéramos salir calor del cubito hacia el aire —en otras palabras, si viéramos que el aire se calentaba y que el cubito de hielo se enfriaba más— la ley, como se ha formulado, quedaría violada.

Podemos apreciar mejor el aspecto revolucionario de esta ley aparentemente inocua en nuestra experiencia diaria volviendo a la Primera Ley de la Termodinámica. Vimos en el capítulo 1 que el calor extraído del interior del frigorífico, el trabajo mecánico realizado por el compresor, la energía eléctrica utilizada por el sistema, y la energía química del combustible quemado por la central térmica para generar esta electricidad son intercambiables. Según afirma la ley, los transportes de una cantidad dada de calor desde el cubito de hielo al aire y del aire al cubito de hielo son dos procesos perfectamente equivalentes y reversibles. El punto importante es que la energía no puede desaparecer sin más: ha de conservarse. Pero ahora el ejemplo del cubito de hielo demuestra que hay algo más de que hablar aparte de la energía. Es *posible* que el cubito de hielo se enfríe cada vez más en el fregadero, pero en la realidad esto no sucede. Parece como si algo en la naturaleza estuviera actuando para imponer una dirección concreta al flujo de calor.

Esta formulación de la Segunda Ley de la Termodinámica parece tan general que de entrada no permite sacar de ella ninguna conclusión importante. Pero, de hecho, podemos utilizar esta formulación para deducir una propiedad importante de los motores. Podemos demostrar que es imposible construir un motor cuyo solo efecto sea extraer una cierta cantidad de energía en forma de calor de un objeto caliente y convertir esta energía completamente en trabajo mecánico. La demostración de lo dicho es tan sencilla que podemos exponer nosotros mismos el argumento. Supongamos que

fuera posible un motor así. Entonces en nuestra concepción de físico, sería como el aparato de la figura 66. Extraería una cantidad de calor Q' de un depósito a la $T_{caliente}$ y lo convertiría en una cantidad equivalente de trabajo E sin descargar ningún calor sobrante en el depósito frío.

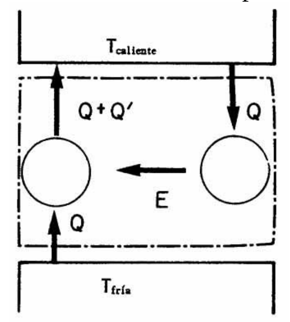


Fig. 66

Pero si esto fuera posible podríamos utilizar la energía producida por la máquina hipotética para hacer funcionar un frigorífico ordinario. Este frigorífico extraería una cantidad de calor Q del depósito frío y devolvería esta cantidad más la energía E al depósito caliente. Pero si consideramos el motor hipotético y el frigorífico como un solo motor (imaginemos que los dos están alojados en una sola caja indicada por la línea de rayas y puntos), este motor combinado extraería una cantidad de calor Q del depósito frío y entregaría una cantidad neta de calor Q al depósito caliente sin utilizar ningún trabajo. En otras palabras, ¡la máquina combinada conseguiría que el calor pasara espontáneamente de un cuerpo frío a otro caliente!

Sabemos que este flujo espontáneo no tiene lugar (por el mismo motivo que un frigorífico no funciona si no lo enchufamos), por lo tanto, podemos deducir que un motor que convierte completamente el calor en trabajo no puede existir.

Estas dos afirmaciones —que el calor no puede pasar de un cuerpo frío a un cuerpo caliente y que el calor no puede convertirse completamente en trabajo— están tan íntimamente relacionadas que suelen considerarse como formulaciones equivalentes de la Segunda Ley de la Termodinámica. Fijan las limitaciones importantes que la naturaleza impone en la intercambiabilidad del calor con otras formas de energía. Afirman, de hecho, que si

queremos conseguir un trabajo produciendo una temperatura elevada (p. ej., quemando gasolina en nuestro coche) *tenernos que* descargar parte de la energía del combustible quemado al exterior en forma de calor sobrante. Esperar lo contrario equivale lógicamente a decir que es posible construir un frigorífico capaz de funcionar sin enchufarlo.

Esta condición significa también que una vez se ha depositado el calor sobrante en el depósito de menor temperatura existente en el medio ambiente, ya no puede convertirse más en trabajo útil. Esto suele significar en la práctica que una vez descargado el calor sobrante en la atmósfera o en el océano, ya no puede servir para hacer funcionar un motor. Por ejemplo, hay tanta energía en el movimiento de las moléculas de un kilómetro cúbico de agua de mar como en la producción anual de cien centrales eléctricas. La Segunda Ley nos dice que a pesar de tener la energía almacenada en el agua no podemos hacer uso de ella.

Esta limitación es especialmente importante para las modernas sociedades industriales porque gran parte de la energía que utilizamos se obtiene creando «depósitos» calientes cuando quemamos combustibles fósiles. Casi siempre hay un proceso de alta temperatura en la base de las máquinas que mantienen nuestra sociedad, tanto si es la gasolina de un automóvil como el carbón de una central térmica. Podríamos caracterizar toda la economía energética de un moderno estado industrial como un sistema para extraer la energía química almacenada en los hidrocarburos y descargar calor sobrante en el medio ambiente. Al final de este proceso convertimos la energía disponible del combustible en energía no disponible formada por calor de baja calidad o de desecho. Por lo tanto, mientras quemamos nuestro carbón y nuestro petróleo consumimos las formas de energía fácilmente disponibles, obligando a las futuras generaciones a descubrir sistemas sustitutivos (y más difíciles) de producir sus depósitos calientes.

Ante la cantidad de trabajo que obtenemos hoy en día de los motores movidos por el calor, es difícil recordar que hace sólo dos siglos la fuente principal de energía motriz eran los músculos, del hombre o de los animales. La época de principios del siglo XVIII fue emocionante, porque precisamente cuando empezaba a surgir la necesidad de tener nuevas fuentes de energía un pequeño grupo de ingenieros empezó a descubrir la manera de extraer las enormes energías almacenadas bajo tierra en forma de carbón. Antes, el único uso a que podía destinarse cualquier tipo de combustible

hidrocarbónico era a la producción directa de calor. El desarrollo del motor de vapor por Thomas Newcomen y James Watt en los años anteriores a la Revolución Americana, permitió utilizar el calor generado por la combustión del carbón para producir trabajo, para hacer funcionar las fábricas, los buques y las locomotoras. Había empezado la gran combustión de energía almacenada y su transformación en calor de desecho, y el mundo desde entonces ya no ha sido más el mismo.

Pero si bien los motores térmicos convencionales estuvieron en el mercado varias décadas antes de 1800 no se tenía una comprensión científica real de las leyes que regían su funcionamiento. El desarrollo de la ciencia del calor, y en especial de los motores térmicos, fue obra de un joven ingeniero francés llamado Sadi Carnot. Carnot, hijo de uno de los generales de Napoleón y él mismo oficial de artillería, estaba preocupado por el hecho de que casi todo el desarrollo de los nuevos motores de vapor tuviera lugar en Inglaterra. Era consciente de los peligros que esto planteaba para Francia, y como miembro de la primera generación de jóvenes franceses educada en la nueva Ecole Polytechnique de París (institución fundada por Napoleón para formar ingenieros y todavía hoy la escuela técnica más prestigiosa de Francia) se propuso llegar a comprender sobre una base científica el funcionamiento del motor térmico.

Carnot, a pesar de frecuentes interrupciones sirviendo en las guerras napoleónicas, publicó una monografía en 1819 que, junto con otros estudios relacionados con el funcionamiento de la máquina de vapor, contenía una formulación precisa de la Segunda Ley de la Termodinámica. Carnot fue el primer científico que enfocó el motor térmico desde el punto de vista del físico, es decir, fue el primero en plantearse el funcionamiento de un ideal abstracto de motor, en lugar de intentar mejorar un modelo que ya estaba en producción. Este método de investigación le llevó a una consecuencia de la Segunda Ley que tiene una enorme importancia para el moderno debate de la política energética.

Carnot empezó intentando imaginar el aparato más simple posible que tuviera todos los rasgos esenciales de la máquina real de vapor. El resultado de su pensamiento fue una máquina idealizada, sin fricción (llamada actualmente máquina de Carnot). Está representada en la figura 67.

La máquina de Carnot consiste esencialmente en un cilindro lleno de gas que puede ponerse en contacto con dos depósitos, uno a la temperatura

$T_{caliente}$ y el otro a la temperatura $T_{frío}$. El primer paso en el funcionamiento de la máquina está esquematizado en la figura 67a. Se pone en contacto el cilindro con el depósito caliente, y una cantidad de calor que llamaremos $Q_{caliente}$ pasa al gas. Esto obliga al gas a expandirse empujando el pistón hacia arriba. Si hay un peso sobre el pistón, como está indicado en el dibujo, el gas al expandirse realiza un trabajo porque levanta el peso. Podemos considerar esta fase del ciclo de Carnot análoga al golpe de potencia de un motor de automóvil, cuando el pistón es impulsado hacia abajo por la ignición de la gasolina y el movimiento resultante se utiliza para mover el coche.

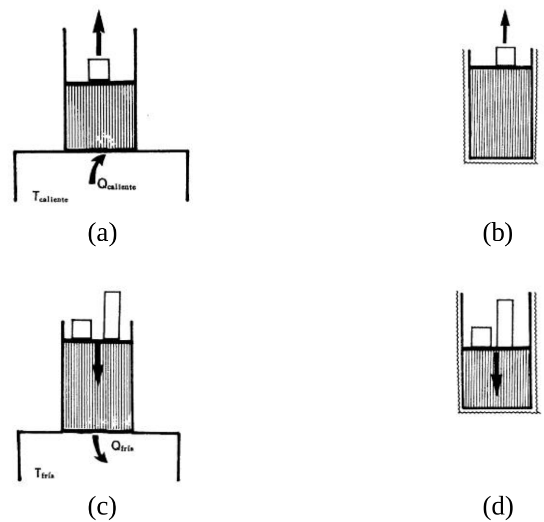


Fig. 67

La siguiente fase del ciclo de Carnot, dibujada en la figura 67b, consiste en aislar el cilindro de cualquier fuente de calor (imaginémoslo envuelto en un aislamiento muy bueno). Puesto que el gas está caliente continuará expandiéndose, levantando el peso y haciendo más trabajo en el curso del proceso. Sin embargo, no existe ahora ninguna fuente de donde extraer calor, y el gas en expansión se enfriará. Esta fase de la operación continúa

hasta que la temperatura del gas alcanza $T_{frío}$, la temperatura del depósito frío.

En este punto hemos extraído del gas en expansión todo el trabajo que podemos. Para tener un motor real, debemos devolver el gas a su estado original de modo que el ciclo pueda empezar de nuevo. Esto exigirá de nosotros un trabajo. Un modo de hacer este trabajo es levantar un peso hasta el nivel que ocupa ahora el pistón. Si procedemos de este modo y al mismo tiempo ponemos el cilindro en contacto con el depósito frío (v. fig. 67c) el peso adicional obligará al pistón a bajar, comprimiendo el gas. Normalmente en este punto la temperatura del gas subiría, del mismo modo que una bomba de aire se calienta cuando inflamos un neumático de la bicicleta. Sin embargo, si llevamos a cabo la compresión lentamente, el calor que serviría para calentar el gas puede pasar al depósito frío y la temperatura del gas se mantendrá constante. La cantidad de calor que pasa al depósito frío puede llamarse $Q_{frío}$. Esto es lo que hasta ahora hemos llamado «calor de desecho». Vemos en este ejemplo que la aparición del calor de desecho está íntimamente relacionada con la necesidad de devolver un motor a su estado original después de que ha hecho un trabajo, es decir, con la exigencia de que el motor funcione siguiendo un ciclo. Las dos partes aisladas del ciclo sirven para cambiar la temperatura del gas y pasarla de la temperatura del depósito caliente a la del depósito frío.

La fase final del proceso de Carnot obliga a aislar una vez más el cilindro. El gas ya no dispone de un depósito frío donde entregar el calor de desecho, y la temperatura del gas subirá a medida que el peso impulsa el pistón hacia abajo. Si escogemos cuidadosamente el peso, la presión del gas lo equilibrará exactamente cuando la temperatura del gas llegue a $T_{caliente}$. En este punto podemos quitar el peso que añadimos después del segundo paso del ciclo, ponemos de nuevo el cilindro en contacto con el depósito caliente y empezamos de nuevo todo el ciclo.

Debería ahora hacerse evidente la analogía entre el motor de Carnot y un motor térmico real, como el que tenemos en nuestro coche. Lo que hemos llamado depósito caliente no es más que el calor generado quemando hidrocarburos. En nuestro coche podemos identificar este depósito como la mezcla de gasolina y aire que se está quemando en el cilindro. El depósito frío es el aire exterior dentro del cual se descarga el calor del motor. El

trabajo realizado por el gas en expansión es lo que desplaza el coche hacia delante, y el trabajo realizado por el peso al comprimir el gas corresponde al trabajo realizado al situar de nuevo el pistón en lo alto de su carrera dentro del cilindro. Puede establecerse una analogía similar entre el motor de Carnot y cualquier otro aparato que produce trabajo a partir de un combustible en ignición.

Una máquina real de Carnot sería imposible de fabricar, como cualquier ideal, entre otros motivos porque no tiene en cuenta la fricción entre sus partes móviles. A pesar de ello, Carnot pudo llegar a cuatro conclusiones muy importantes.

En primer lugar, la máquina de Carnot entrega una cantidad neta de trabajo. Si tomamos la cantidad de trabajo necesario para levantar el peso adicional hasta el nivel del pistón después del paso b, dibujado en la figura 67, y lo restamos del trabajo efectuado por el gas en expansión en los pasos *a* y b, el resultado es positivo. Cada vez que el motor efectúa un ciclo completo proporciona una cantidad neta de trabajo útil.

En segundo lugar, ningún motor funcionando entre los depósitos de temperaturas $T_{caliente}$ y $T_{frío}$ puede ser más eficiente que el motor de Carnot. Esta afirmación no es obvia pero su demostración es muy semejante a la demostración de que todo motor debe generar calor de desecho. La idea consiste en suponer lo contrario de lo que uno quiere demostrar, y entonces ver que esta suposición equivale a tener un frigorífico capaz de funcionar sin enchufarlo. Si suponemos que hay un motor más eficiente que el motor de Carnot, podemos utilizar este motor para hacer funcionar un frigorífico. Una cadena de argumentos algo más complicada que la de antes demuestra que la existencia de una tal máquina implicaría la existencia de una máquina capaz de transferir calor de un objeto frío a otro caliente sin que para ello tuviera que consumir energía.

En tercer lugar, el rendimiento de un motor de Carnot viene dado por

$$\eta - 1 = \frac{T_{frío}}{T_{caliente}}$$

donde $T_{caliente}$ y $T_{frío}$ se miden en la escala de Kelvin (v. capítulo 7). El rendimiento de cualquier aparato se suele definir como el trabajo que sacamos de él dividido por la energía que le introducimos. En el ciclo de Carnot la combustión del combustible proporciona una cantidad de energía $Q_{caliente}$ al sistema, mientras que el pistón en movimiento proporciona una cantidad neta de trabajo, tal como hemos visto. El cociente entre estos dos números es el rendimiento del motor, y Carnot demostró que está relacionado por la fórmula anterior con las temperaturas de los dos depósitos. Este resultado es muy importante porque nos da el máximo rendimiento que tendrá *cualquier* motor al funcionar entre las dos temperaturas dadas. Más tarde daremos algunos ejemplos prácticos basados en esta fórmula.

En cuarto lugar, la cantidad $Q_{caliente}/T_{caliente} - Q_{frío}/T_{frío}$ es cero en una máquina de Carnot. En cualquier motor real es mayor que cero. El calor absorbido o emitido por una sustancia dividido por la temperatura de la sustancia se llama cambio en la entropía de la sustancia. Esta definición puede parecer algo formal y arbitraria, pero la entropía puede visualizarse fácilmente en función del movimiento atómico, como veremos luego. En el ciclo de Carnot, el primer término de la expresión es el cambio de entropía durante la fase *a* de la figura 67, cuando se entrega calor al gas. El segundo término es el cambio de entropía cuando se descarga calor al depósito frío en la fase c, y el signo menos significa que el calor sale del gas en lugar de entrar en él. Por lo tanto, según la fórmula anterior el cambio neto de entropía en el ciclo de Carnot es cero, y cualquier motor real tendrá siempre un cambio neto de entropía positivo, un aumento neto de entropía, cada vez que recorre su ciclo.

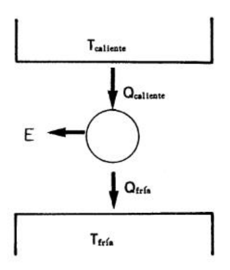


Fig. 68

De hecho, las conclusiones tres y cuatro no son independientes una de la otra. Si dibujamos un esquema del motor de Carnot, como el de la figura 68, la conservación de la energía exige que E, la cantidad neta de trabajo producido sea igual a $Q_{caliente}$ - $Q_{frío}$, es decir, a la diferencia entre el calor absorbido y el calor descargado. Puesto que el rendimiento se define por $W/Q_{caliente}$, se deduce de la conclusión cuatro que

$$\eta = \frac{W}{Q_{caliente}} = \frac{Q_{caliente} - Q_{frío}}{Q_{caliente}} = 1 - \frac{Q_{frío}}{Q_{caliente}} = 1 - \frac{T_{frío}}{T_{caliente}}$$

que es precisamente la conclusión tres.

La limitación del rendimiento de un motor es probablemente una de las afirmaciones más importantes que la termodinámica tiene que hacer sobre política energética. Aparte de la creciente escasez de hidrocarburos líquidos, pocas cosas provocan tantos debates como el problema de la producción de electricidad. Este debate se caldeará todavía más en el futuro, porque una de las soluciones para la escasez de gasolina es diseñar un automóvil eléctrico.

Un generador eléctrico es un aparato que toma el calor creado por algún proceso, como la combustión del carbón o la fisión del uranio, y lo convierte en trabajo haciendo girar el eje de una turbina que a su vez convierte esta energía rotativa en electricidad. El proceso de conversión de la energía calorífica en rotación es un ejemplo específico de la producción de trabajo a partir del calor y, por lo tanto, tiene que estar sujeto a la Segunda Ley. Sabemos gracias a la discusión del ciclo de Carnot que el rendimiento máximo que puede tener un generador es el rendimiento de un motor de Carnot funcionando entre un depósito caliente a la temperatura del vapor y un depósito frío a la temperatura del aire ambiente. La temperatura del vapor en una máquina de vapor funcionando a la presión normal será de 100°C o 373°K. Si el aire exterior está a 300°K o 27°C, el rendimiento máximo de este aparato será solamente del 20%, o sea, que cuatro quintas partes de la energía presente en el carbón se convertirán en calor no aprovechable de desecho.

La única manera de compensar este bajo rendimiento es elevar la temperatura del vapor (y, por lo tanto, su presión). En una central térmica moderna puede usarse incluso vapor a 500°K. El máximo rendimiento posible

de una central moderna será, por lo tanto, de un 40%. Para subir a temperaturas superiores habría que trabajar con presiones y temperaturas tales que ningún conducto actual podría resistir.

De hecho los ingenieros eléctricos han elevado el rendimiento de las modernas centrales hasta el 30 y el 35%, alcanzando casi el mismo límite de Carnot. Ya no pueden mejorarlo más sin violar la Segunda Ley, es decir, sin construir un frigorífico capaz de funcionar sin necesidad de enchufarlo.

En definitiva, los planificadores se encuentran entre la espada y la pared. Por una parte la demanda de electricidad está creciendo, pero por otra parte las leyes de la naturaleza exigen que por cada kilovatio-hora de electricidad que producimos, tengan que descargarse dos kilovatios-hora de la energía del combustible como calor inútil. Ante esto algunos técnicos han propuesto la adopción de un sistema energético «suave», es decir, que la electricidad se utilice únicamente para las tareas en las que es esencial (p. ej., el alumbrado y el funcionamiento de motores). Otros usos actuales de la electricidad, como la calefacción del agua y de los interiores podrían resolverse con la energía solar. Se está discutiendo precisamente ahora si este sistema es económico o incluso técnicamente posible, pero el motivo básico de la existencia del debate es el límite expresado en la ley de la termodinámica.

Otro sistema basado en la inevitabilidad del calor inútil generado al producir electricidad es la llamada congeneración. Este sistema se ha intentado con cierto éxito en Europa. La idea básica consiste en construir plantas industriales al lado mismo de las centrales y utilizar el calor sobrante del generador para proporcionar vapor industrial (u otros tipos de calor industrial) a las fábricas. De este modo el calor inútil no es realmente inútil.

Estas consideraciones son importantes, pero las aplicaciones más interesantes de la Segunda Ley se refieren al futuro lejano del Universo. La manera más fácil de discutir este aspecto de la ley es recurrir al concepto de entropía. Cuando hablamos de la máquina de Carnot introducimos esta cantidad diciendo que el cambio en entropía de un sistema era igual al calor que entraba en el sistema dividido por la temperatura del sistema en el momento de la introducción del calor. Aunque esta definición es correcta no puede decirse que nos aclare mucho el significado del término.

Podemos entender mucho mejor la entropía pensando en los átomos. Cuando miramos algo, lo que vemos son cosas macroscópicas: tamaño,

temperatura, presión, etc. Sabemos que lo que vemos está relacionado en cierto modo con lo que los átomos o las moléculas están haciendo en el objeto, pero en realidad no *vemos* átomos. Tomemos el ejemplo de la presión. Sabemos que al inflar un balón o dar presión a un neumático, aumenta la fuerza que las moléculas ejercen sobre las paredes del recipiente. Si pudiésemos observar la pared interior con gran aumento, veríamos una situación parecida a la representada en la izquierda de la figura 69. Moléculas de movimiento rápido chocan contra la pared y rebotan. Cada una de estas colisiones significa que se ejerce una pequeña fuerza y la presión que vemos no es más que la suma de todas las fuerzas ejercidas por todas las moléculas.

Lo importante en esta conexión entre una cantidad macroscópica (la presión) y unos acontecimientos microscópicos es lo siguiente: sólo podemos medir la primera y no sabemos cómo determinar los segundos. Por ejemplo, si se invirtieran las direcciones de las moléculas en la figura de la izquierda de la figura 69, y obtuviéramos la figura de la derecha, no habría cambio en la presión. El resultado neto de las dos colisiones sería el mismo en cada caso y si sólo miráramos la presión sería imposible decir cuál de las dos ha tenido lugar realmente. De hecho si recordamos que hay aproximadamente 10^{26} moléculas en unos cuantos gramos de material, podemos ver que las moléculas se pueden redistribuir de muchos modos distintos sin que cambien las lecturas de ninguno de nuestros instrumentos. El movimiento molecular representa en cierto sentido una especie de gigantesco juego de las tres cáscaras de nuez y la bolita en el que la realidad externa, percibida, es la misma a pesar de las muchas ordenaciones diferentes de la estructura interior.

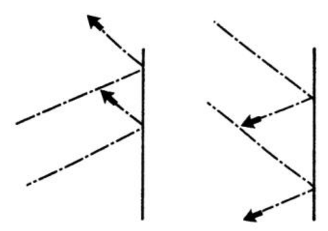


Fig. 69

El número de maneras posibles para cambiar la ordenación interna sin variar los datos macroscópicos se llama peso estadístico del sistema. Un sistema con un peso estadístico elevado puede ir pasando por un gran número de configuraciones sin que nosotros podamos captar ningún cambio. Se dice que un sistema así tiene un gran nivel de desorden.

A fines del siglo XIX el concepto de desorden se utilizó para definir un nuevo tipo de entropía. La nueva entropía era, de hecho, una función matemática del peso estadístico de un sistema. Uno de los grandes triunfos de aquella generación de físicos fue demostrar que este nuevo tipo de entropía, que es la medida del desorden de un sistema, y el tipo antiguo definido en función del calor y de la temperatura eran exactamente lo mismo. La prueba general exige algo de matemáticas, pero podemos ofrecer un argumento simple para demostrar que esta conclusión es razonable. Sabemos por nuestra discusión en el capítulo 1 que si agregamos calor a un sistema los átomos del sistema se moverán en promedio con mayor velocidad. Esto significa que un sistema calentado tiene más estados disponibles para los átomos que el correspondiente sistema sin calentar, porque en el primer caso un átomo dado puede moverse con una gama más amplia de velocidades.

Repitiendo nuestra analogía aumentando el calor aumentamos el número de cáscaras en el gran juego de las cáscaras. Esto significa que el peso estadístico aumenta cuando se agrega calor al sistema y, por lo tanto, aumenta el desorden.

La Segunda Ley expresada en este lenguaje dice que en todo proceso cíclico la entropía del sistema ha de aumentar o como máximo ha de permanecer constante. No puede disminuir. En otras palabras, el Universo ha de evolucionar siempre en la dirección de una entropía creciente. Si seguimos este razonamiento hasta su conclusión lógica, al final el Universo deberá convertirse en una masa vasta y amorfa de material totalmente desordenado. Esto se llama la definitiva muerte térmica del Universo.

La Segunda Ley parece pronosticamos este futuro último, pero no nos dice nada sobre el proceso exacto por el cual llegará la muerte térmica. Meditar sobre este problema nos da un cierto placer fúnebre, y de hecho nuestro conocimiento actual de las leyes físicas nos permite esbozar un cuadro bastante preciso del destino último del Universo.

En nuestra vecindad inmediata sabemos que el Sol agotará su combustible nuclear en unos 5.000 millones de años (5×10^9 años en notación científica). El Sol al cabo de este tiempo empezará a enfriarse y a expandirse convirtiéndose en un tipo de estrella llamada gigante roja. Su periferia exterior estará situada probablemente más allá de la órbita de la Tierra, por lo tanto nuestro planeta quedará absorbido por el Sol. Más tarde, el Sol se encogerá para convertirse en una enana blanca y en unos 100.000 millones de años acabará siendo un montón de cenizas quemadas flotando en el espacio. Un destino similar aguarda a la mayoría de estrellas semejantes al Sol. Recordemos que el Universo tiene actualmente sólo 15.000 millones de años, por lo tanto estamos hablando de una época futura diez veces más vieja que la edad total del Universo.

Las estrellas mayores tendrán un final más espectacular: explotarán convirtiéndose en supernovas y luego se colapsarán hasta llegar al estadio de estrellas de neutrones o de agujeros negros. En este momento las cosas empiezan a ir más despacio. La lenta escala temporal que rige la extinción de las estrellas es sustituida por una escala temporal todavía más lenta, mientras los restos de la galaxia continúan rodando y chocando unos con otros. Puede esperarse que en una escala temporal de 10^{28} años las cenizas y las estrellas pequeñas vayan encontrando agujeros negros. Cuando esto suceda las cenizas se desgarrarán y caerán dentro del agujero negro, para no salir de él nunca más. A medida que este proceso de colisión siga su curso toda la materia de la galaxia acabará dentro de los agujeros negros.

Pero éste no es el fin. Durante todo este tiempo la expansión del Universo seguirá su curso. Al final la temperatura de la radiación de fondo será inferior a la temperatura de los agujeros negros y empezará un nuevo proceso. Según las leyes de la mecánica cuántica, los agujeros negros empezarán a radiar energía al espacio. Esencialmente, empezarán a evaporarse, descargando su energía en el baño de radiación que les rodee. Este proceso ocupa unos 10^{53} años para un agujero negro del tamaño del Sol. Cuando haya finalizado no quedará nada excepto un mar de fotones y de neutrinos en interminable expansión. La Segunda Ley de la Termodinámica habrá ganado su última batalla.

Quizá fue pensando en este escenario final por lo que Steven Weinberg, premio Nobel de 1979 dijo: «Cuanto más comprensible se hace el Universo más absurdo parece.»

IX. LECCIONES DE UNA BOMBILLA

Cuando Thomas Edison inventó la bombilla corriente de incandescencia estaba buscando un sistema limpio de iluminación que sustituyera las linternas de gas y las lámparas de petróleo predominantes en su época. Logró su objetivo, como todos sabemos, pero desde el punto de vista de la energía, la bombilla eléctrica no es básicamente un sistema de alumbrado. Por ejemplo, una bombilla corriente de 100 vatios produce unos 5 vatios de luz visible y 95 vatios de calor en forma de radiación infrarroja. En cierto modo, el invento de Edison no es más que un aparato para gastar energía cara en forma de electricidad y convertirla en energía de baja calidad en forma de calor, produciendo adicionalmente un poco de luz.

Quienes han de cuidar las tuberías en invierno conocen bien el calor que puede emitir una bombilla. Un sistema habitual en el campo para impedir que las tuberías de agua se congelen es dejar por la noche una bombilla encendida en el sótano. A menudo el calor que emite la bombilla es suficiente para que el agua no se pare. Se utilizan también bombillas de cien vatios para calentar las incubadoras de los pollitos recién salidos del cascarón y para llevar a cabo innumerables tareas cuando se precisa una fuente de calor barata y de baja intensidad. Por lo tanto, aunque consideramos de entrada la bombilla como una fuente de luz, no ha pasado del todo desapercibida su utilidad como calefactora.

Nos preguntamos, pues, por qué motivo la corriente eléctrica de la bombilla produce tanto calor y tan poca luz. Para poder responder a esta pregunta primero tenemos que saber exactamente qué es una corriente eléctrica y cómo transfiere de entrada su energía a la bombilla.

Hemos aprendido que un solo átomo contiene dos tipos de carga eléctrica, la carga positiva del núcleo pesado y la carga negativa de los electrones que lo orbitan. En general, cada átomo aislado tiene tanta carga negativa en sus electrones como carga positiva en su núcleo, de modo que el efecto total es el de un objeto carente de carga eléctrica. Cuando los átomos se juntan para formar materiales ordinarios, esta neutralidad eléctrica puede o no puede conservarse. En algunos materiales, como la sal común de mesa

(cloruro de sodio), algunos átomos ceden electrones, quedando de este modo cargados positivamente y otros átomo toman electrones, quedando cargados negativamente. Los átomos en los que las cargas de los electrones no anulan la carga del núcleo se llaman iones. La carga eléctrica neta del material en su conjunto continúa siendo cero, pero cada átomo ya no continúa siendo neutro eléctricamente, porque tiene o bien demasiados electrones o bien demasiado pocos.

En los metales que se utilizan normalmente, según sabemos, para transportar corriente eléctrica, por ejemplo el cobre o el aluminio, existe una situación algo distinta. Aquí cada átomo del metal pierde uno o más electrones, pero no hay átomos en las proximidades que puedan recoger estos electrones. El resultado aparece en la figura 70. El metal está formado por un conjunto ordenado de iones positivos (es decir, átomos metálicos que han perdido electrones), y alrededor de estos iones flota un verdadero mar de electrones libres. Estos electrones fueron cedidos por los átomos cuando se formó el metal, pero hace tiempo que dejaron de mostrar cualquier apego a su lugar de origen. Estos electrones pertenecen, de modo muy real, a todo el metal, más que a un átomo solo. Normalmente se mueven de modo muy rápido y por esto no quedan atrapados cuando se acercan a los iones positivos, a pesar de que existe entre los dos una fuerza de atracción. Se parecen en cierto modo a los coches que corren por una carretera: los pequeños hoyos o las depresiones superficiales no los detienen porque se mueven con la velocidad suficiente para atravesarlos.

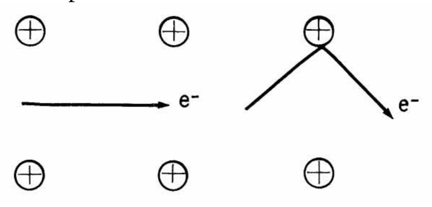


Fig. 70

Un material donde los electrones disponen de libertad para moverse de este modo se llama conductor. Si aplicamos una fuerza a los electrones libres, se desplazarán en la dirección de esta fuerza. Llamamos corriente eléctrica al flujo resultante de partículas cargadas. De hecho podemos imaginar que la corriente de electrones en un hilo es análoga a la corriente de

coches que circula por una carretera. Si nos preguntaran sobre el tráfico de una carretera, una manera de contestar la pregunta sería quedarse a un lado y contar el número de coches que van pasando. Podríamos observar, por ejemplo, que hay un movimiento de 100 coches por hora o quizá de 3 coches por minuto.

Si pudiésemos imaginar del mismo modo a un ingeniero microscópico de tráfico situado junto a un hilo contando electrones sabríamos cuántos electrones por segundo pasan ante él. Si contara $6{,}3\times10^{18}$ electrones por segundo, nos diría que la corriente era de un amperio (el amperio es una unidad bautizada en honor de André Ampère, uno de los pioneros de la ciencia de la electricidad).

Para completar el cuadro deberíamos indicar que no todos los materiales tienen electrones libres en su interior. Cuando los átomos se combinan para formar otros materiales (p. ej., la cera o el plástico) cada electrón queda sujeto firmemente. Si en tales casos aplicamos una fuerza los electrones no se desplazarán a través del material, simplemente porque no hay electrones libres que puedan hacerlo. Un material así se llama un aislante. Finalmente hay unos cuantos materiales, especialmente los minerales silicio y germanio, cuyos electrones están atrapados como en un aislante, pero atrapados de modo bastante flojo. Los movimientos relativamente suaves debidos al movimiento atómico a temperatura ambiente son ya suficientes para desprender unos cuantos electrones. Estos materiales conducirán la electricidad, pero con mucha menos facilidad que un metal como el cobre. Se llaman semiconductores y forman la base de la llamada industria del estado sólido en Estados Unidos. Un material dado tendrá una de las tres posibles propiedades descritas con respecto a la corriente de electrones según sea la estructura de los átomos individuales que lo forman. El principio general es que los electrones de cada material se ordenarán de modo tal que minimice la energía total del sólido (v. cap. 3).

Por lo tanto, en un conductor algunos electrones tienen libertad para moverse dentro de una matriz de iones fuertemente positivos. Cuando corre una corriente por un hilo, esperaremos ver una situación como la de la figura 71. Los electrones se acelerarán y su velocidad irá aumentando. Sin embargo, al encontrarse con un ion pesado, rebotarán, como si una pelota de ping-pong chocara en su camino con una gran piedra y rebotara contra ella. Estas colisiones impiden que los electrones alcancen una velocidad

demasiado grande en el hilo, pero también tienen otro efecto. En cada colisión entre un electrón y un ion el ion gana algo de energía y se desplaza algo más deprisa. El ion está anclado de modo efectivo por la estructura metálica, por lo tanto esta velocidad mayor se manifiesta por una vibración más rápida del ion en la estructura metálica.

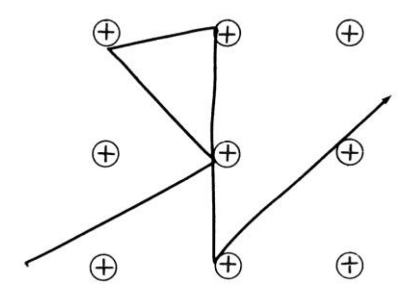


Fig. 71

Si imaginamos el metal como un juego articulado con los iones representando las piezas donde se articulan los puntales, este movimiento puede visualizarse como una pequeña vibración de estas piezas alrededor de su posición normal. El efecto neto del movimiento de la corriente eléctrica es aumentar la intensidad de esta actividad vibratoria.

Vimos en el capítulo 1 que la vibración atómica está directamente relacionada con la cualidad que llamamos temperatura del material formado por los átomos. Cuanto más deprisa se mueven los átomos, más alta es la temperatura. Si el material es un trozo de hilo con una corriente eléctrica pasando por su interior, las colisiones inevitables entre los electrones y los iones obligarán a los iones a vibrar más rápidamente, aumentando así la temperatura del metal. Por lo tanto, la respuesta a la pregunta que nos hicimos al principio es que una bombilla se calienta porque los electrones que componen la corriente que pasa por su interior chocan con los iones del hilo metálico y les obligan a moverse más rápidamente.

La propiedad de un metal que obliga a convertir en calor la energía de movimiento de los electrones se llama resistencia eléctrica. En algunos metales el espaciamiento y los enlaces de los átomos son tales que pueden absorber con relativa facilidad la energía del río de electrones. Se dice que

estos metales tienen una alta resistencia, puesto que producen una cantidad relativamente elevada de calor a partir de la corriente eléctrica. El filamento de tungsteno de una bombilla es un material de este tipo, porque al girar el interruptor y dar la corriente la temperatura alcanzada es tan alta que brilla al blanco vivo. El material de la resistencia calefactora de nuestra tostadora también tiene una resistencia elevada, como podemos deducir fácilmente viendo que brilla al rojo mientras prepara nuestro desayuno. En general, cuando deseamos producir calor a partir de la electricidad, como en la tostadora o en los sistemas de calefacción domésticos, utilizamos un material de resistencia muy elevada para convertir en calor la máxima cantidad de energía transportada en la corriente de electrones.

Sin embargo, hay muchas situaciones en las que deseamos precisamente lo contrario: minimizar el calor generado por la corriente. Cuando deseamos transportar la energía eléctrica de un punto a otro, por ejemplo de la central a la ciudad, o de las líneas eléctricas a la bombilla de la habitación, no queremos malgastar energía generando gran cantidad de calor. Lo ideal en estos casos es un material con una transferencia de energía relativamente reducida en las colisiones entre electrones e iones; decimos que estos materiales tienen una resistencia eléctrica baja. Los materiales de resistencia baja más usuales son el cobre y el aluminio, aunque el oro y la plata se utilizan ocasionalmente en circunstancias especiales (como en las naves espaciales) cuando el coste no cuenta mucho.

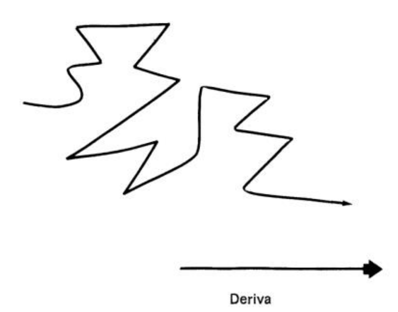


Fig. 72

Por lo tanto, incluso en las cuestiones domésticas, como las conexiones de los aparatos eléctricos, juega un papel importante el proceso de colisiones atómicas entre los electrones en movimiento y los iones pesados de un hilo metálico. Muchas personas se sorprenden al enterarse de la cantidad de colisiones que se dan incluso en un buen conductor como el cobre. El movimiento de un electrón a través de un hilo se parece más al de un jugador de rugby abriéndose paso entre una nube de contrincantes que al de un sprinter corriendo sin obstáculos por la pista. En cada colisión el electrón tiene casi tantas probabilidades de rebotar con el ion como de salir moviéndose de nuevo hacia delante. El camino de un electrón podría parecerse al de la figura 72. El movimiento total es un conjunto de cambios de dirección al parecer casuales sobre el cual se superpone una lenta deriva en la dirección de la corriente. En los hilos que conducen a nuestra bombilla de 100 vatios esta velocidad de deriva es bastante pequeña. En promedio, el avance de un electrón se medirá en fracciones de centímetro por segundo, bastante menos que la velocidad con que nosotros andamos.

A fines del siglo XIX cuando se estaban construyendo las primeras centrales eléctricas públicas y la electricidad empezaba a cambiar la vida de todo el mundo, los científicos estaban muy interesados en comprender las leyes de la resistencia eléctrica. Desarrollaron entonces el cuadro general que hemos esbozado aquí, pero continuaron adelante. Empezaron a preguntarse cómo afectaban diversos factores, incluyendo la temperatura, la resistencia de un conductor. Aunque parezca extraño esta investigación que parecía interesar sólo a un puñado de físicos profesionales condujo a un descubrimiento que quizás afecte las vidas de quienes vivan en las sociedades avanzadas en las próximas décadas.

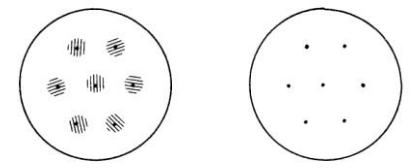
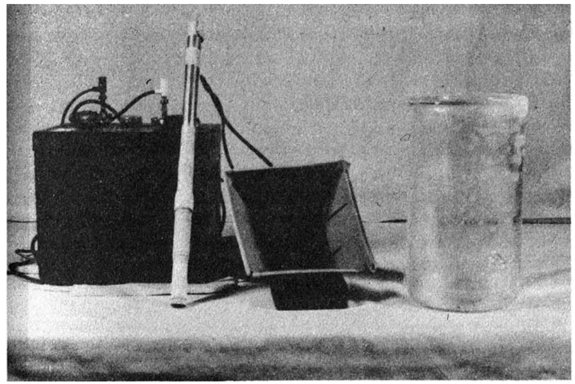


Fig. 73

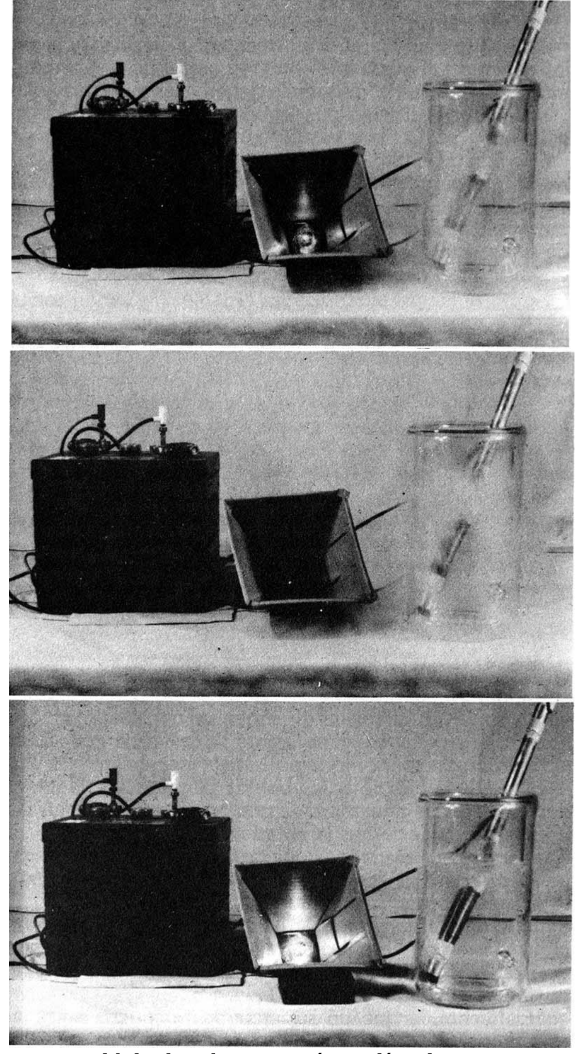
Desde el punto de vista de un electrón, un hilo conductor podría presentar el aspecto de la izquierda de la figura 73. Si estudiamos el hilo a

nivel microscópico veremos enfrente nuestro la matriz de iones pesados. El hilo está a una temperatura normal, y por lo tanto estos iones vibrarán alrededor de sus puntos de equilibrio. El efecto de esta vibración es que los iones aparecen «borrosos», y disminuye así considerablemente la probabilidad de que el electrón consiga pasar sin chocar con un ion.

Sin embargo, si disminuimos la temperatura del hilo, la situación empieza a parecerse a la de la derecha de la figura 73. La vibración de los iones disminuye, y por lo tanto también disminuye el área borrosa. Este «encogimiento» deja más espacio para el avance de los electrones, y disminuye, por lo tanto, el número de colisiones. Estas colisiones son las que causan la resistencia, por lo tanto esperamos que al ir disminuyendo la temperatura del hilo disminuirá también su resistencia eléctrica (y el calor generado al pasar una corriente por el hilo). A temperaturas muy bajas la resistencia debería ser muy pequeña.



La corriente de una batería pasa por una bobina de hilo de cobre ordinario devanada alrededor de un tubo de metal. A la temperatura ambiente la resistencia es tan alta que la bombilla situada dentro de la pantalla apenas puede encenderse.



Cuando se sumerge el hilo de cobre en nitrógeno líquido su resistencia disminuye y la bombilla brilla cada vez con mayor intensidad. Fotos de Judith Peatross.

En 1911 el físico holandés Heike Kamerlingh Onnes, trabajando en Leiden, estaba midiendo la resistencia de un pequeño cilindro de mercurio a muy bajas temperaturas con el propósito de verificar esta predicción. Vio que a medida que disminuía la temperatura la resistencia de su muestra bajaba uniformemente. Luego, a una temperatura de unos –269°C (sólo 4,2° por encima del cero absoluto descrito en el cap. 7), la resistencia cayó a cero. Fijémonos que no se redujo a una cifra muy pequeña sino que cayó completamente a cero.

Este resultado era completamente inexplicable según la teoría entonces vigente del origen atómico de la resistencia. Mientras los electrones continuasen moviéndose por el hilo tenían que chocar con los iones. Estas colisiones tenían que acelerar los movimientos de los iones, y por lo tanto la corriente tenía que generar calor. Es difícil entender que un cambio de la temperatura de una fracción de grado pueda afectar un proceso tan fundamental.

El fenómeno que Onnes descubrió accidentalmente se llama superconductividad. Se presenta en una variedad de materiales aparte del mercurio, aunque la temperatura en la que se produce la transición a la resistencia cero es diferente en cada caso. Pero el hecho especial ha quedado firmemente establecido: que en algunos materiales es posible eliminar completamente la resistencia eléctrica.

En un superconductor una corriente eléctrica no puede perder energía de ningún modo. La corriente existente en un superconductor ha de continuar circulando sin disminución, tanto si hay una fuente de potencia conectada al superconductor como si no la hay. Por ejemplo, si conectamos una batería a una bobina de material superconductor, dejamos que se forme una corriente en el material y luego desconectamos la batería, la corriente continuará circulando. Los electrones que constituyen la corriente no pueden perder su energía de ninguna manera, por lo tanto la corriente de la bobina continuará circulando, al pie de la letra, eternamente. De hecho en Leiden hay un bucle con una corriente de este tipo que ha estado circulando desde hace más de cincuenta años sin ninguna disminución medible.

El hecho de que un superconductor pueda sostener estas corrientes persistentes sugiera la aplicación más importante y probable de este extraño efecto. Vimos en el capítulo 6 que una corriente eléctrica cuando circula

por un bucle produce un campo magnético indistinguible del campo magnético debido a un imán permanente normal. Si el bucle es de hilo normal tenemos que enviar corriente continuamente con una batería o con un generador para compensar la pérdida de energía debida a la resistencia. Un electroimán normal, tanto si es un gran modelo industrial como la bobina de encendido de nuestro coche se ha de conectar continuamente a una fuente de energía eléctrica si queremos utilizar su campo magnético. Una limitación importante en el tamaño del campo magnético que podemos crear con un electroimán ordinario es la necesidad de eliminar continuamente el calor generado en el proceso, de lo contrario acabaría fundiendo el imán. Hay que introducir, por lo tanto, grandes cantidades de agua de refrigeración a través de tuberías embutidas en el cuerpo del imán, de modo semejante al sistema de refrigeración de un automóvil.

Sin embargo, con un imán superconductor no hay que gastar ninguna energía para contrarrestar la resistencia, por lo que una vez empieza a circular la corriente inicial, el imán funciona sin tener que estar enchufado. El único coste de mantenimiento es el de mantener el imán a una temperatura de unos pocos grados por encima del cero absoluto, tarea que se puede llevar a cabo fácilmente recurriendo a técnicas modernas similares a las de un termo. Tenemos así por primera vez una fuente relativamente barata de campos magnéticos muy intensos.

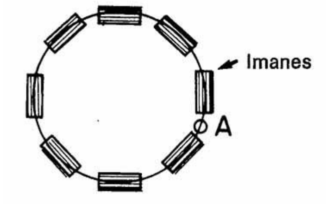
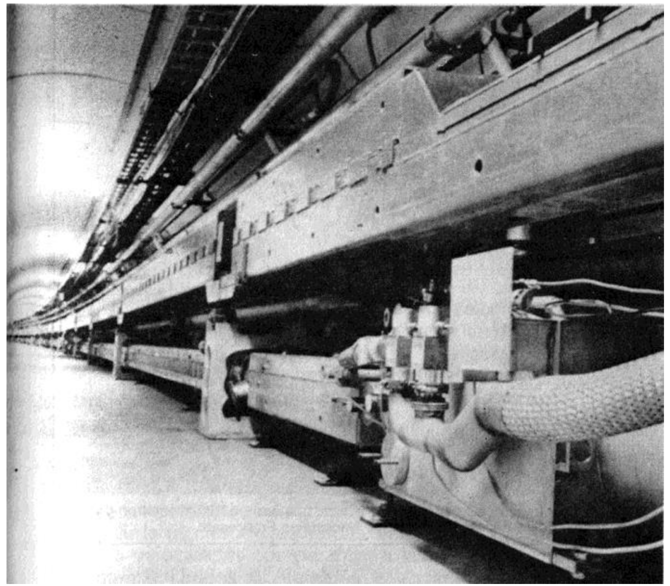


Fig. 74

Hasta hace muy poco la principal utilización de los imanes superconductores era la construcción de aceleradores de partículas, como el del Laboratorio Nacional del Acelerador Fermi cerca de Chicago. Estas máquinas se utilizan para impulsar protones a velocidades próximas a las de la luz y luego hacerlos chocar contra blancos estacionarios. La mayor parte de los

conocimientos obtenidos sobre la estructura profunda de la materia se deben a estas máquinas. Se utiliza una estructura como la de la figura 74 para impartir la necesaria energía a los protones. Se construye un gran anillo y se rodea de imanes. Cuando se insertan protones en un anillo de este tipo, los imanes ejercen fuerzas que mantienen a los protones en un movimiento circular, o sea dentro del anillo. Si en el acelerador sólo hubiera los imanes, los protones continuarían circulando a velocidad constante, y la única energía utilizada sería la energía necesaria para mantener «activos» a los imanes. Sin embargo, en circunstancias normales cada vez que los protones llegan a un punto determinado del anillo (como el punto A de la figura), un aparato electrónico les da un pequeño suplemento de energía. Al cabo de muchos ciclos, estos pequeños impulsos se han sumado alcanzando energías muy altas.



Túnel del acelerador principal del Fermilab, en Batavia, Illinois. El anillo superior de imanes es el acelerador de 400 B*e*V. En el anillo inferior se están instalando los imanes para el acelerador superconductor. Foto cedida por el Laboratorio del Acelerador Nacional Fermi.

Pero lo realmente asombroso de un acelerador de este tipo es su tamaño. La máquina del Fermilab, por ejemplo, tiene casi 1.600 metros de diámetro, lo que significa que ha de recubrirse con casi 4.800 metros de imanes. En la primera fase de construcción de la máquina se utilizaron electroimanes convencionales, y cuando la máquina estaba funcionando a plena capacidad, sólo para que los imanes continuaran funcionando había que gastar una fracción notable de la energía eléctrica disponible en el estado de Illinois. En muchos laboratorios, el coste de la electricidad ha obligado en ocasiones a desconectar la máquina porque no había dinero para pagar la factura de la compañía eléctrica.

Está en marcha actualmente un programa en el Fermilab para instalar un segundo anillo de imanes (duplicando esencialmente la energía que podrá impartirse a los protones). Sin embargo, en esta ocasión los imanes serán superconductores, convirtiendo así a esta instalación en la mayor del mundo con superconductores. Cuando se haya puesto en marcha este «duplicador de energía», se habrá alcanzado un hito importante en la transformación de la superconductividad de una curiosidad de laboratorio en una herramienta práctica y cotidiana. Como sucede a menudo con los progresos de la alta tecnología, la mayor parte de este programa ha sido subvencionado por el programa de investigación básica del gobierno federal.

Proyectos como el duplicador de energía del Fermilab demuestran que es perfectamente posible introducir la fabricación a gran escala de tipo industrial en la producción de imanes superconductores. Existen ya varias empresas pequeñas que los producen en Estados Unidos. Un imán superconductor comercial típico está fabricado con una aleación de niobio y cinc y funciona sumergido en helio líquido a unos 4 grados sobre el cero absoluto.

El mercado mayor para esta tecnología está formado actualmente por los laboratorios de investigación, pero las perspectivas futuras más interesantes de los imanes superconductores están en el campo del transporte. Actualmente el límite de velocidad de un tren de pasajeros se sitúa entre 160 y 320 kilómetros por hora y viene determinado por la fricción entre las ruedas del tren y las vías. El TGV francés (*trains á grande vitesse*) viaja a 360 kilómetros por hora, y la mayoría de ingenieros creen que esta velocidad es la más alta que puede conseguirse con trenes convencionales.

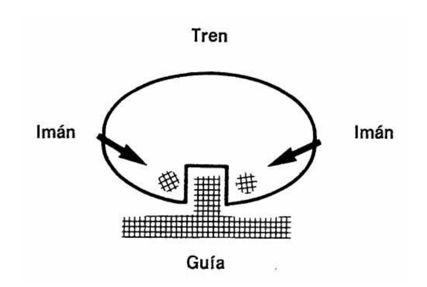
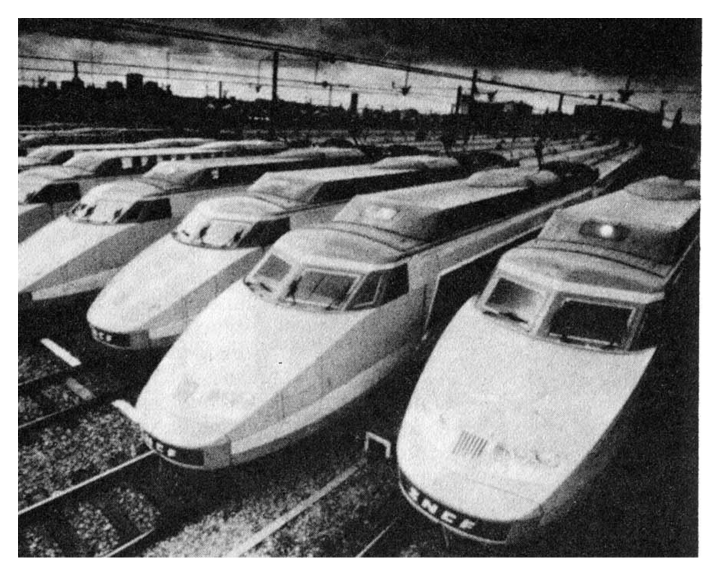


Fig. 75

Sin embargo, la actual disponibilidad de los imanes superconductores, introduce nuevas e interesantes posibilidades. Si pudiésemos utilizar la fuerza magnética para levantar el tren y separarlo del suelo, no necesitaría ruedas y podría aumentar considerablemente su velocidad máxima. La figura 75 presenta un posible esquema constructivo de este tren. El tren corre sobre una guía metálica. Dentro de la carcasa del tren hay un conjunto de imanes superconductores. Cuando el tren está parado se aguanta sobre ruedas de caucho. Sin embargo, cuando el tren empieza a moverse, se desarrolla una fuerza entre los imanes y la barra guía, una fuerza algo similar a la existente entre dos imanes, con lo que el tren «despega», levita literalmente, unos cuantos centímetros por encima de la vía. Al no existir la fricción de las ruedas, el tren puede acelerarse ahora a velocidades comparables a las de un avión.

Estados Unidos y Alemania están trabajando sobre esta idea, pero el líder mundial en el desarrollo de la «levitación magnética» es Japón. Los ferrocarriles japoneses han hecho circular prototipos de tamaño natural en una vía de pruebas situada cerca de Miyazaki en el sur del Japón ¡a velocidades superiores a los 520 kilómetros por hora! Trenes de este tipo podrían transportar pasajeros del centro de Washington D.C., a la ciudad de Nueva York en menos de una hora, aproximadamente el tiempo necesario para que un avión de línea vuele de un aeropuerto al otro. Y por ser los superconductores básicamente aparatos muy eficientes desde el punto de vista energético, el coste de la energía consumida por estos trenes sería una fracción del coste actual.



El TGV francés o *train à grande vitesse* que corre a 320 kilómetros por hora. Foto cedida por los Ferrocarriles Nacionales Franceses.

Visionarios como Robert Salter de la Rand Corporation están pensando ya en algo superior a este tren e imaginan un sistema de transporte realmente revolucionario basado en la superconductividad. Del mismo modo que la fricción de las ruedas impone un límite superior a la velocidad de un tren convencional, la resistencia del aire a través del cual se desplaza un tren impone un límite a la velocidad máxima de un tren de levitación magnética. Salter cree que el siguiente paso en el transporte terrestre será un tren de levitación magnética circulando dentro de un túnel de donde se habrá extraído el aire. Calcula que estos trenes podrían alcanzar velocidades de unos 10.000 kilómetros por hora, lo que permitiría atravesar el territorio continental de Estados Unidos en menos de una hora. Falta saber, desde luego, si llegará a emprenderse alguna vez una obra de ingeniería tan monumental como un túnel a través de todo el país, pero el hecho de que pueda plantearse el tema indica el tremendo potencial de la nueva tecnología de los superconductores.

Esta incursión en el mundo de la tecnología futura no nos informa mucho sobre la pregunta básica que nos planteamos al introducir el tema de la superconductividad: cómo se explica la existencia de un superconductor. La explicación no llegó hasta 1957, medio siglo después del descubrimiento de Onnes, y la dieron tres físicos norteamericanos, John Bardeen, León Cooper y J. Robert Schrieffer, que recibieron por este motivo el Premio Nobel de Física de 1972.

Imaginemos un único electrón moviéndose a través de una red de iones pesados como la de la figura 76. Cuando el electrón pasa entre un par de iones, las fuerzas eléctricas tenderán a desviar a los iones hacia el electrón, como muestra el dibujo. El electrón no se ve afectado porque las fuerzas ejercidas por los iones se anulan mutuamente, pero el electrón avanza tan rápidamente que cuando los pesados iones pueden responder a su acción él ha pasado ya hace rato. Esta respuesta adopta la forma dibujada en el diagrama del centro: después del paso del primer electrón tenemos dos iones cargados positivamente más cerca uno del otro que en su posición normal de antes. Si dispusieran de tiempo suficiente los iones regresarían a sus posiciones de partida, como es lógico, pero de momento hay una concentración de cargas positivas en este punto del metal y esto tiende a atraer nuevos electrones.

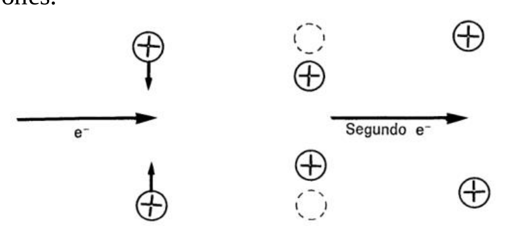


Fig. 76

Un segundo electrón, atraído por la concentración de cargas positivas seguirá el camino del primero. Los dos electrones forman un llamado par de Cooper y avanzan en tándem a través del sólido. En un material típico habrá varios centenares de iones pesados entre el miembro del par que va en cabeza y el de la cola, de modo que la repulsión eléctrica entre los dos tiene un efecto limitado sobre su comportamiento.

Cuando la temperatura del metal desciende por debajo del punto en el cual este delicado mecanismo no queda completamente enmascarado por el movimiento térmico de los iones, los electrones tienden a formar pares en su movimiento a través del conductor. Además, todos los electrones libres forman pares de este tipo, de modo que el conductor queda saturado con pares de electrones que se solapan.

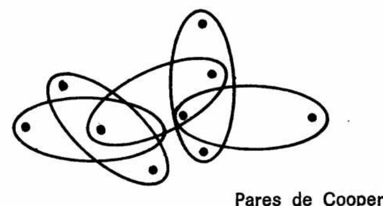


Fig. 77

Las distancias entre los miembros de cada par de Cooper son tan grandes que los pares dentro de un material dado se solapan mutuamente, como en la figura 77. Si imaginamos que cada espagueti de un plato es un par de Cooper con un electrón en cada extremo, la relación entre los pares queda representada bastante bien por el confuso entrelazamiento de los espaguetis. Si un único electrón de esta red se encuentra con un ion en el sólido, el único sistema de que dispone el ion para desviar el electrón es desviar la red entera.

Una analogía nos permitirá entender este punto. Un único automóvil avanzando por una carretera dará un bote e incluso quizá se desviará al encontrar un bache. Sin embargo, si avanzara por la carretera una escuadra de coches y todos los componentes de esta escuadra estuvieran soldados entre sí, la desviación no podría producirse. La escuadra pasaría por encima del bache sin hacerle caso, y cada coche al encontrarse encima del bache lo atravesaría gracias al movimiento conjunto de la escuadra.

Del mismo modo, cuando un único electrón se encuentra con un ion puede perder energía y generar calor, pero los que están unidos formando un conjunto de pares de Cooper pasarán de largo sin experimentar ningún cambio. El fenómeno de la superconductividad se puede explicar, pues, aduciendo la formación de pares entre los electrones libres del conductor.

La lección más importante que podemos aprender de la bombilla puede ser la siguiente: las descripciones sencillas del comportamiento de sistemas en un dominio (p. ej., la región de temperaturas normales) quizá tenga que ser sustituida por procesos completamente diferentes e inesperados en otro dominio. No podemos decir nunca, de entrada, qué nuevo fenómeno va a tener una gran utilidad práctica, por lo tanto conviene siempre empujar lo más lejos posible las fronteras del saber, aunque cuando empezamos nuestra exploración la probabilidad de un rendimiento práctico nos parezca pequeña. Si alguien hubiese dicho a Kammerlingh Onnes que sus experimentos sobre la resistencia a bajas temperaturas podrían provocar algún día grandes mejoras en el transporte humano sin duda se hubiera mostrado muy escéptico.

X. ¿QUÉ ASPECTO TENDRÍA UN GIGANTE?

Hace mucho se emitía regularmente por la televisión una serie de aventuras llamada «Tierra de los Gigantes». La trama era sencilla: una nave espacial llena de personas aterrizaba violentamente en un planeta habitado por seres que tenían nuestro mismo aspecto, pero que medían de diez a trece metros de estatura. El serial se centraba en las aventuras de la tripulación mientras vivían en las paredes de las casas de los gigantes.

Era fácil, desde luego, plantear algunas objeciones obvias al programa. Se dijo que la probabilidad de encontrar una raza de extraterrestres gigantescos viviendo en un lugar sospechosamente parecido a una zona residencial de Los Ángeles era muy baja. A un nivel más profundo, la hipótesis esencial del guion, o sea, que los cuerpos de los gigantes tendrían una forma y unas proporciones muy semejantes a las nuestras, tocaba una dificultad muy vieja en la ciencia, el problema de la escala.

Desde hace mucho tiempo, las personas ocupadas en trabajos prácticos sabían que para construir algo mayor no basta construir cada parte con un tamaño proporcionalmente mayor. Por ejemplo, es imposible fabricar un buen buque de carga cogiendo un buen bote de remos y haciendo cada una de sus partes diez veces mayor. A medida que aumenta el tamaño absoluto de cualquier cosa, hay que introducir en el diseño básico cambios sustanciales. La naturaleza procede también de este modo. Un elefante es mayor que una hormiga, pero también sus proporciones son notablemente distintas. Lo mismo podría decirse sobre una casa de piedra y una catedral. El motivo por el cual han de introducirse cambios en las proporciones cuando se aumenta el tamaño de una estructura tridimensional se llama el problema de escala, y tenemos que comprender los principios en que se basa si queremos volver a la historia de los gigantes.

Galileo fue el primero que supo resolver el problema. Galileo llevó a cabo muchas creaciones prácticas y pasó gran parte de su tiempo trabajando en problemas de ingeniería y de guerra. Uno de ellos era la molesta tendencia de las máquinas grandes a fallar cuando se copiaban de diseños de modelos más pequeños y muy eficaces. En 1638, cuatro años antes de su

muerte, Galileo publicó un libro titulado *Diálogos Referentes a las Dos Nueuas Ciencias.* La segunda parte trata del movimiento de los proyectiles y se suele considerar como un gran avance en el desarrollo de la física. En general, los comentadores modernos dejan de lado la primera parte, «Nueva Ciencia». Sin embargo, en este diálogo Galileo resolvió el problema de escala y de este modo abrió el camino para importantes progresos en ingeniería.

Galileo sitúa la acción haciendo que Sagretio, uno de los participantes en el diálogo, comente: «Si se construye una máquina grande de modo que sus partes estén en la misma proporción mutua que las de una más pequeña, y si la pequeña es lo bastante fuerte para el cometido al cual se le destinaba, creo que la mayor debería ser capaz de resistir cualquier prueba severa a la que pueda someterse.» Sagretio luego inicia una discusión sobre el hecho de que los trabajadores del gran astillero llamado Arsenal de Venecia habían notado que los andamiajes para los buques grandes tenían que construirse con troncos mucho mayores de lo que indicaría la simple ampliación proporcional de los andamiajes pequeños.

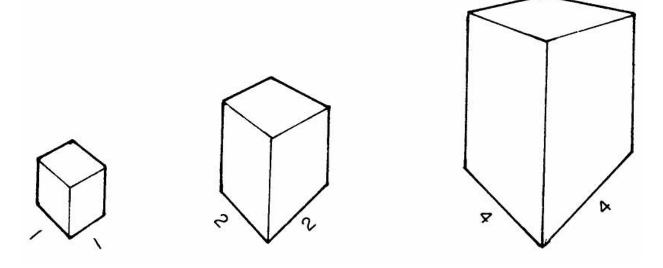


Fig. 78

En lugar de seguir la discusión de Galileo, podemos llegar directamente al centro de la cuestión imaginando un cubo de veinte centímetros de lado. Según sea el material este cubo pesará 8 kilos (agua), 62 kilos (acero) o 10^{15} kilos (un cubo formado enteramente por núcleos atómicos). La presión en la cara inferior del cubo será el peso del cubo dividido por el área de la cara inferior. Si el cubo es de acero, la cara inferior estará sometida a una presión de 0,155 kilos por centímetro cuadrado. Es una presión relativa-

mente baja para una estructura de acero, inferior a la del aire en un neumático corriente de automóvil. No hay peligro alguno de que el cubo se hunda bajo su propio peso.

Pero supongamos que duplicamos todas las dimensiones del cubo. El nuevo cubo (v. fig. 78) medirá ahora 40 centímetros de lado. El volumen del cubo será ahora 40 × 40 × 40 = 64.000, 8 veces el volumen del cubo original y, por lo tanto su peso será de 496 kilos. Por otra parte, el área de la sección transversal de la cara inferior del nuevo cubo será de 40 × 40 = 1.600 centímetros cuadrados de modo que la presión sobre la cara inferior del cubo duplicado será de 0,310 kilos por centímetro cuadrado, el doble de la presión del cubo original. Este ejercicio numérico, aun siendo tan sencillo, contiene la solución del problema de escala.

Partiendo del cubo de 40 centímetros, continuemos la operación de multiplicar los lados por dos. El siguiente paso será un cubo de 80 centímetros de lado, que pesará 3.968 kilos y tendrá en la base una presión de 0,620 kilos por cm^2. Se ve fácilmente que cada vez que duplicamos as dimensiones del cubo también duplicamos la presión ejercida sobre cada centímetro cuadrado de la cara inferior. Al final este proceso alcanza un límite. En el caso del acero, cuando tenemos un cubo de unos 6.500 metros de lado la fuerza de la gravedad actuando sobre el acero producirá una fuerza sobre la cara inferior suficiente para superar las fuerzas que mantienen unidos los átomos del material, y el acero del fondo del cubo se desmoronará. Decimos en lenguaje técnico que la presión debida al peso del acero en el cubo supera la resistencia a la tracción del acero y el metal se fractura. Vemos con este ejemplo que el argumento defendido por Sagretio ha de ser erróneo. Sabemos que un cubo de 20 centímetros de lado es capaz de aguantar su propio peso, pero podemos calcular que un cubo con dimensiones ampliadas proporcionalmente y de 6.500 metros de lado no será una estructura estable. El cubo mayor no cumple la prueba mecánica más simple: sostener su propio peso. No hay esperanza de que pueda superar una «prueba severa».

A partir de este ejemplo puede verse claramente la solución que debe darse al problema de escala. El punto clave es que el volumen del material (y por lo tanto su peso) aumenta más deprisa que el área de la sección transversal que ha de aguantar este peso. En el caso de nuestro cubo, el volumen aumenta con un factor de 8 cuando se duplica la longitud de un lado, en

cambio el área de la base aumenta sólo con un factor de 4. Un medio sencillo de visualizar este efecto es imaginar que duplicamos las dimensiones del cubo añadiendo más bloques al cubo original (v. fig. 79). Para producir de este modo un cubo duplicado, tenemos que añadir siete cubos más, cada uno de 20 centímetros de lado. Esto da un total de ocho cubos, cuatro en la cara delantera y cuatro en la trasera.

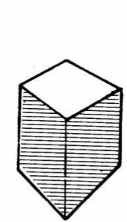
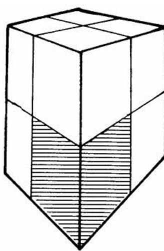



Fig. 79

En relación al cubo original el proceso de duplicación lo único que hace es poner un cubo de más encima suyo. Esto, a su vez, significa que el cubo original ha de aguantar no sólo su propio peso sino también el del nuevo cubo. Por lo tanto, cuando se multiplica por dos la escala de la estructura se multiplica por dos el peso que aguanta el cubo original, sin hacer nada para aumentar su capacidad de sostener este peso. Cada nueva duplicación agrava esta situación hasta que se alcanza el punto de fractura.

Pasar de un cubo de acero de veinte centímetros de lado a otro de 6.500 metros supone un factor de ampliación de 32.500, un salto bastante notable para cualquier libro de cuentas. Aumentar a escala una hormiga hasta llegar a un elefante supone un factor de varios miles, o sea, que la ampliación es más o menos comparable.

En cuanto a los gigantes con los que empezamos el capítulo, pasar a escala de personas de dos metros a seres de 15 metros supondría aumentar la presión de los huesos con un factor de 5. Los huesos humanos tienen un margen de seguridad aproximadamente de 150, es decir, que el límite de fractura del hueso es casi 150 veces el peso que el hueso puede aguantar normalmente. Puesto que la rotura de un hueso no es un fenómeno raro, podemos deducir que esta proporción es un compromiso entre la fuerza de

un organismo y su capacidad de moverse fácilmente. En un gigante ampliado a escala este margen de seguridad bajaría a 30.

Para que nuestros gigantes no tengan que pasar gran parte de su tiempo restableciéndose de sus fracturas óseas, un simple aumento a escala de las dimensiones de una persona normal es inadecuado. El problema es encontrar una manera de aumentar la masa del cuerpo sin superar los límites de resistencia del material estructural, en este caso la materia ósea. Este problema puede resolverse de varias maneras. En arquitectura se utilizan en los edificios grandes materiales diferentes, de mayor resistencia. Un edificio de madera raramente tendrá más de 17 metros de altura, ni un edificio de piedra superará los cien metros. El aumento explosivo de la construcción de rascacielos que ha marcado la arquitectura urbana de nuestro siglo fue posible gracias al desarrollo de la producción en gran escala de acero para las vigas en I. Con aceros modernos pueden construirse edificios de más de 350 metros. En cada caso para poder apilar mayor cantidad de material sobre un metro cuadrado de espacio de planta sin alcanzar los límites de resistencia se cambia el material encargado de sostener el edificio. La misma naturaleza ha seguido a menudo esta regla. La ampliación a escala de la hormiga al elefante que antes citábamos funciona, por lo menos en parte, porque la frágil envoltura exterior de la hormiga se ha sustituido por el esqueleto interior del elefante.

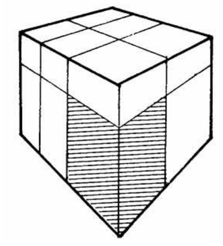


Fig. 80

Pero hay otra estrategia aplicable que no recurre a nuevos materiales. Supongamos que queremos duplicar el cubo de un modo ligeramente distinto. Podemos preguntarnos lo siguiente: «¿Cómo construir una estructura compuesta de ocho cubos de acero sin duplicar la carga sobre la superficie inferior?» La figura 80 nos da una respuesta. Si cortamos dos de los cubos

en tercios, podemos hacer una estructura de acero con seis cubos en la base y una altura de 1 1/3 de cubo. Con esta disposición el peso del acero sobre cada centímetro cuadrado es de sólo 0,206 kilos, bastante menos que los 0,310 kilos del cubo duplicado.

Evidentemente, la nueva disposición ya no es un cubo; los lados son rectángulos en lugar de cuadrados. Contienen la misma cantidad de material que un cubo duplicado, pero hay mucha menos presión en la cara inferior. Esto sugiere un sistema para construir estructuras mayores: cambiar las proporciones a medida que aumenta el tamaño. Cuanto más material se incluya más achaparrada y ancha tendrá que ser la estructura.

La comparación de las proporciones de un ser humano y de un elefante demuestra que la naturaleza también ha seguido este camino. La resistencia a la tracción del material óseo de los seres humanos y de los elefantes es aproximadamente la misma, por lo tanto, un cambio en las proporciones es el sistema que permite lograr un aumento significativo de tamaño.

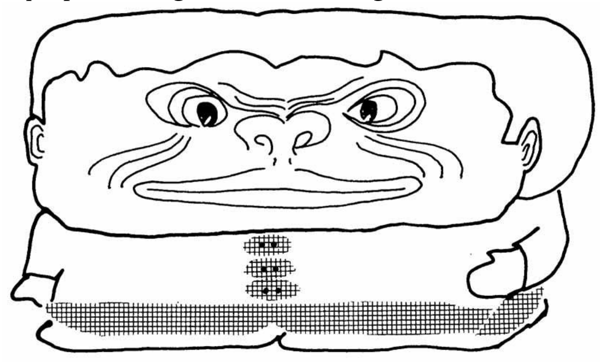


Fig. 81

Un gigante de 10 metros sería cinco veces mayor en todas sus dimensiones que una persona de 2 metros. Por lo tanto, pesaría 125 veces más, y un hombre de 90 kilos aumentado cinco veces pesaría más de 11 toneladas. Este peso es superior al de un elefante y, por lo tanto, es totalmente imposible que algo tan pesado pueda tener dimensiones remotamente parecidas a las de un ser humano.

Supongamos para precisar que deseemos diseñar un gigante de 11 toneladas cuyo esqueleto tenga que estar formado por material parecido al

hueso humano, y supongamos que queremos mantener el margen de seguridad del esqueleto por encima de 100. El gigante tendrá que medir 3 metros de estatura, 2,5 metros de delante a atrás y 5,3 metros de ancho. Se parecerá más a un tanque Sherman que a una persona, y probablemente no será un personaje muy apetecible en un serial de TV.

Conociendo ya cómo funcionan las ampliaciones a escala, podemos hacer muchas cosas divertidas. Por ejemplo, uno de mis fallos es mi afición a las viejas películas de ciencia ficción. Una de mis favoritas, *El Principio del Fin,* muestra a una raza de langostas gigantes nacidas en Illinois debido a unos experimentos con radiactividad. Las langostas, que no tienen en qué ocuparse, atacan Chicago, cuyos habitantes se salvan gracias a la intervención final del héroe y su bella ayudante. Una langosta normal tiene unos 5 centímetros de largo, por lo tanto fabricar un ejemplar de 15 metros de largo supone un factor de ampliación de 300. Si suponemos que el exoesqueleto de la langosta tiene el mismo factor de seguridad que los huesos humanos (150), una langosta de 15 metros, en lugar de constituir una amenaza para la ciudad de Chicago y para la heroína no haría más que hundirse bajo su propio peso. ¡Qué lástima! porque la película era estupenda.

Podemos situamos en otro nivel y aplicar la idea del mayor cubo posible de acero a algo más familiar. Podemos preguntamos la altura máxima que podría alcanzar una montaña en la superficie de la Tierra sin hundirse. La densidad del granito es sólo un 40 % de la del acero, y la resistencia a la tracción es la mitad de la del acero. Si utilizamos el mismo razonamiento que antes y sustituimos el acero por el granito, veremos que las dimensiones máximas de una montaña son 11.200 metros. Esta cifra no queda muy lejos de los 9.000 metros que tienen las montañas más altas de la Tierra.

Todas estas suposiciones se mueven en el marco de la disciplina llamada resistencia de los materiales. Hemos aprendido a calcular los efectos del cambio a escala de las dimensiones, pero todavía no hemos intentado tratar el problema a un nivel más fundamental. Deberíamos poder discutir temas como el tamaño máximo de una montaña en función de las propiedades de los átomos que componen los materiales, y no en función de cantidades medidas empíricamente como la resistencia a la tracción. Además, hay algunas regularidades en las propiedades de los materiales que sólo pueden explicarse haciendo referencia a la estructura atómica. Por ejemplo, sabemos que las densidades de la mayoría de sólidos van de una a diez

veces la densidad del agua. ¿A qué se debe esto? Sabemos también que la presión necesaria para deformar la mayoría de los sólidos se sitúa entre 100.000 y un millón de veces la presión ejercida normalmente por la atmósfera. ¿Por qué? Para poder responder a preguntas de este tipo tenemos que examinar el mismo átomo.

Sabemos que el núcleo de un átomo es muy pequeño comparado con el tamaño de las órbitas de los electrones. Si el núcleo de un átomo típico tuviera el tamaño de un bolo de bolera, sus electrones podrían imaginarse como un puñado de guisantes dispersos por una superficie comparable a la de una gran ciudad. Por lo tanto, lo lógico es que las interacciones de un átomo con sus vecinos estén dominados por los electrones, ya que son lo que uno se encuentra al acercarse desde fuera a un átomo.

Vimos en el capítulo 4 que muchas propiedades del electrón pueden describirse si lo imaginamos como una onda en lugar de una partícula. Por lo tanto, podremos aprender algo sobre el comportamiento de un electrón cuando está confinado dentro de un átomo si recordamos otros tipos de ondas confinadas que pueden visualizarse más fácilmente. Quizás el ejemplo más corriente de una onda confinada sea el chapoteo del agua en una bañera. Hay una onda en movimiento, pero la reflejan las paredes sólidas de la bañera. Otro ejemplo familiar es la vibración de una cuerda punteada, la de una guitarra, por ejemplo. Decimos que la vibración hacia arriba y hacia abajo de la cuerda es una onda estacionaria y la distinguimos de una onda progresiva. Es evidente que los dos tipos de ondas poseen energía, porque en la bañera las partículas de agua están moviéndose y en la guitarra las partículas de la cuerda hacen lo mismo. Cuando hablamos de la energía de la onda nos referimos a la energía cinética de estas partículas. También sabemos que todo lo que posee energía es capaz de hacer un trabajo (es decir, de ejercer una fuerza a lo largo de una distancia) y esto se cumple tanto con ondas como con otros fenómenos.

Un electrón confinado en un átomo puede concebirse mejor como una onda estacionaria, y por lo tanto se parece más a una cuerda de guitarra que a la onda de una bañera. Sabemos al mismo tiempo que un electrón más tarde o más temprano acabará en una órbita donde su energía total sea mínima. Son fáciles de entender los dos efectos contrapuestos que según sabemos deben existir para producir este mínimo. Imaginemos un electrón en una órbita de un radio dado. Su energía tiene dos componentes: la energía

eléctrica potencial debida a que el electrón y el núcleo tienen cargas opuestas, y la energía relacionada con la onda del electrón. Si desplazamos el electrón a una órbita de radio menor, la energía eléctrica potencial disminuirá pero la energía cinética de la onda aumentará. Esta segunda afirmación equivale a decir que si reducimos el tamaño de la bañera el agua se moverá más violentamente, y esto a su vez aumentará la energía de la onda. El electrón se estabilizará en una órbita donde estos dos efectos se compensen y la energía sea mínima.

Resulta que en el caso de un único electrón que gira alrededor de un único protón (el átomo de hidrógeno) este radio es aproximadamente de $0{,}75 \times 10^{-8}$ cm. Éste será, por lo tanto, el tamaño aproximado de un átomo. Los átomos con más electrones serán más grandes, como es lógico, pero incluso el uranio, con sus noventa y dos electrones tiene un radio de unos $2{,}2 \times 10^{-8}$ cm, sólo el triple de grande. Por lo tanto, en primera aproximación todos los átomos tienen aproximadamente el mismo tamaño.

Siguiendo este razonamiento sobre la estructura de un átomo hemos llegado a la conclusión de que los átomos han de tener aproximadamente 10^{-8} cm de radio. Esto puede explicar un poco que las densidades de todos los sólidos parezcan comparables. En un sólido los átomos están empaquetados y juntos como canicas en una cajita. Queda muy poco espacio «inútil» entre ellos. Si imaginamos cada átomo como una esfera de radio R_A, el volumen de un átomo sólo será $\frac{4\pi}{3} R_A^3$. La masa del átomo en cambio reside casi totalmente en el núcleo. Puesto que cada protón y cada neutrón tienen una masa aproximada de $1{,}7 \times 10^{-24}$ gramos, la masa del átomo será este número multiplicado por el número total de protones y neutrones del núcleo (número que suele denotarse por la letra A; A es 1 para el hidrógeno y 238 para el uranio).

Cada sólido está formado por un número grande pero finito de átomos. Llamemos N a este número. La masa total del sólido será entonces N veces la masa de un átomo, y el volumen total será aproximadamente N veces el volumen de este átomo. Por definición, la densidad del sólido será su masa total dividida por su volumen total.

Si tomamos el ejemplo del hidrógeno, A = 1 y R_A es $0{,}75 \times 10^{-8}$ cm. La densidad del hidrógeno sólido debería ser

$$\varrho_H = \frac{N \times 1.7 \times 10^{-24} g}{N \times 1.7 \times 10^{-25} cm^3} \approx 1\ g/cm^3$$

que es aproximadamente la densidad del agua. Por su parte el uranio tiene A = 238 y R_A = 2,2 x 10^{-8} cm. Su densidad será

$$\varrho_U = \frac{N \times 238 \times 1.7 \times 10^{-24} g}{N \times 4.5 \times 10^{-23}} = 9.0\ g/cm^3$$

Esto es ligeramente inferior a diez veces la densidad del agua.

Este ejercicio demuestra que las densidades de los sólidos son tan parecidas porque el tamaño total de un átomo ha de ser del orden de 10^{-8} cm, mientras que la masa del átomo es un múltiplo de la masa del protón. La división de esta masa por este volumen nos dará siempre un número situado en el margen de 1-10 gramos/cm^3. El hecho de que no haya metales mucho más densos que el plomo y que el uranio ni sólidos mucho menos densos que el agua está relacionado de modo simple con las cantidades fundamentales de la física atómica.

Antes de continuar hay que explicar un posible punto de confusión sobre este argumento. Hemos calculado la densidad de los sólidos suponiendo que los átomos están juntos y apretados y que no quedan espacios libres entre ellos. Esto no significa, desde luego, que hayamos supuesto que los átomos en sí sean macizos. Sabemos que los átomos son en su gran parte espacio vacío. Sin embargo, los sólidos están construidos de tal modo que apenas hay solapamiento entre átomos vecinos, y ésta es la base de nuestro cálculo.

En último extremo, la resistencia de cualquier material depende de lo bien que pueda resistir la acción de fuerzas externas. Esto dependerá en cierto grado de la constitución del material. Hemos visto en el capítulo 9 la disposición interior de una clase de sólidos, los metales conductores. En estos metales hay una red de iones positivos, cada uno de los cuales ha contribuido con un electrón a un mar de cargas negativas. Cada electrón se mueve a través de la red independientemente del átomo que originalmente lo cedió al mar de cargas.

Sabemos por nuestra anterior exposición que los electrones de los metales se mueven: por lo tanto, tendrán energía cinética y podrán ejercer una presión mediante colisiones (v. cap. 7, una discusión detallada sobre cómo puede generarse de este modo una presión). Sin embargo, si consideramos los electrones como ondas, nuestra primera impresión es que tienen espacio de sobra por donde moverse. Cada electrón sería una onda confinada en la pieza entera de material, como si dejáramos suelta la onda de la bañera en el océano. Si esto fuera cierto, la presión ejercida por los electrones sería, por lógica, muy pequeña.

Sin embargo, hay un hecho referente a los electrones que no hemos expuesto todavía y que niega esta conclusión. Resulta que los electrones tienen que cumplir una regla llamada principio de Pauli, según la cual no puede haber dos electrones en el mismo estado. (El término *estado* tiene un significado bastante especializado cuando se aplica a una partícula como el electrón. Para nuestros fines supondremos que hemos definido el estado de un electrón en un sólido una vez especificada su velocidad y su sentido de giro o spin.) El principio lleva el nombre de su descubridor, el físico austríaco Wolfgang Pauli, quien recibió el premio Nobel en 1945. Esto significa en el caso de un metal, que si un electrón se está moviendo en un punto del metal con una cierta velocidad y en una cierta dirección, girando alrededor de su eje de un modo dado, no puede haber en ningún otro lugar del metal otro electrón que tenga exactamente esta velocidad y esta rotación. Hay más de 10^{26} electrones en un trozo de metal del tamaño de un dedal, por lo tanto, los estados del electrón correspondientes a una onda desplazándose a gran velocidad por todo el metal se llenarán rápidamente, y otros electrones deberán tener longitudes de onda correspondientes a distancias mucho más cortas.

Una manera de visualizar el principio de Pauli es comparar los electrones a coches en un aparcamiento. Cuando un coche ha ocupado una plaza, ningún otro coche puede ocuparla. De este modo el aparcamiento queda «lleno», en el sentido de que no puede admitir ya más coches, mucho antes de que tenga ocupado hasta el último centímetro cuadrado de su superficie. Los electrones de un metal siguen la misma regla: también ellos ocupan estados disponibles mucho antes de lo que nosotros podríamos imaginar.

El efecto práctico del principio de Pauli en la resistencia de un metal es que cada electrón tiene en promedio una energía apropiada a una onda confinada a un volumen mucho más pequeño. Cada electrón tiene libertad para moverse por toda la red positiva, pero la presencia de los demás electrones lo comprime y confina su onda a un volumen comparable aproximadamente al volumen de un solo átomo. Vimos que la energía de una onda confinada aumenta cuando sus dimensiones se reducen, por lo tanto, el principio de Pauli provoca un aumento grande de la presión debida a los electrones libres en un metal.

Si introducimos las cifras referentes a un metal típico, encontramos que la presión de los electrones es enorme, aproximadamente 100.000 veces la de la atmósfera. Esta presión en el interior del metal lo haría volar a trozos instantáneamente si no quedara cancelada por algo más. La fuerza que se opone a la presión es la atracción eléctrica entre los electrones y los iones. La mejor manera de visualizarla es imaginar los electrones del metal como un gas sometido a gran presión, con los iones positivos formando una red estacionaria fija en el espacio. Si el gas de electrones empezara a expandirse bajo su propia presión, como haría un gas ordinario, la fuerza eléctrica ejercida por los iones positivos rápidamente tiraría de ellos hacia atrás. Aunque cada electrón tiene libertad para pasearse por todo el metal, los electrones en su conjunto están encadenados al material por intensas fuerzas eléctricas. Por lo tanto, nuestra imagen del metal contiene dos fuerzas muy grandes que actúan en direcciones opuestas y crean un equilibrio. La fuerza eléctrica tiende a tirar hacia dentro los electrones y a contraer el metal, mientras que la presión electrónica tiende a reventar el metal.

Si intentamos comprimir un metal con una fuerza externa, lo que hacemos, en realidad, es intentar reducir el volumen donde se encuentran las ondas de electrones. Para conseguirlo tenemos que superar la presión que ejercen estas ondas. Esto significa a su vez que los sólidos sólo empezarán a deformarse cuando alcancemos presiones comparables a 100.000 atmósferas. Esto es lo que se observa en la naturaleza. El llamado módulo compresibilidad (la cantidad que mide la respuesta de un material a la presión) es aproximadamente el mismo para la mayoría de sólidos y corresponde a presiones externas situadas entre 100.000 y un millón de atmósferas.

La resistencia a la tracción de los materiales, una cantidad básica en nuestra discusión del problema de escala, es más difícil de valorar a partir

de los principios teóricos. La reacción de un trozo de material cuando experimenta una fuerza en una dirección, pero tiene libertad para moverse en otras direcciones, depende de muchos factores (como la existencia de fallas microscópicas y de otros defectos), factores difíciles de calcular. En general, la presión necesaria para desmoronar la cara inferior de un bloque de acero es del 1 al 10% de la presión necesaria para obligar a cambiar uniformemente la forma del acero.

La presión ejercida por los electrones cuando tienen libertad de movimiento se llama presión de degeneración. Hemos visto que deberíamos imaginar los electrones como una especie de gas que impregna el material, y la presión que ejercen es análoga a la ejercida por el aire del interior de un neumático inflado. Pero los sólidos terrenales no son el único lugar de la naturaleza donde tales presiones son importantes. Hay muchos objetos de interés para los astrónomos donde juegan también un papel. Consideremos que el Sol es una estrella típica. El Sol mantiene la forma que tiene gracias a dos efectos contrapuestos. Uno es la atracción gravitatoria entre sus diversas partes, y si nada se opusiera a este efecto provocaría el colapso del Sol. La fuerza que lo contrarresta se genera en las reacciones nucleares del interior del Sol. A medida que la energía de esta reacción se escapa hacia el exterior ejerce una presión que anula la atracción, dirigida hacia el interior, de la gravedad, impidiendo así el colapso. Este proceso seguirá su curso durante unos 5.000 millones de años, más o menos, y el Sol mantendrá de modo bastante aproximado su tamaño actual. Sin embargo, llegará un momento en que su combustible nuclear se agotará y después de pasar por una serie de fases de transición empezará a encogerse a medida que la fuerza de la gravedad vuelva a imponerse. Continuará un colapso hasta que algo proporcione una nueva fuerza de oposición.

Como ya podíamos haber supuesto este algo es la presión de degeneración de los electrones del Sol. El Sol, privado de su fuente de combustible nuclear, se irá hundiendo hasta que la fuerza de la gravedad dirigida hacia dentro ya no pueda comprimir más el gas de electrones. El Sol tiene una masa de 2×10^{30} kg, por lo tanto, sabiendo la masa del protón que hemos dado antes, calculamos que debe tener aproximadamente 10^{57} protones. Puesto que el Sol es eléctricamente neutro, debe tener también el mismo número de electrones. En el Sol las temperaturas son tan altas que todos

estos electrones han sido arrancados de sus átomos y constituyen precisamente el tipo de gas electrónico que hemos atribuido a los metales. Para calcular el tamaño del futuro Sol basta con que preguntemos qué radio de un gas electrónico de este tamaño hay que comprimir hasta que la presión que ejerza contrarreste la fuerza de la gravedad (que será bastante más elevada que la de la actual superficie solar, porque entonces el Sol será mucho más pequeño y denso). Después de hacer nuestros cálculos vemos que la estrella resultante tendrá un diámetro de unas decenas de miles de kilómetros, más o menos el tamaño de la Tierra. El Sol se convertirá en un tipo de estrella llamada enana blanca, y su estado ejemplifica el destino de la mayoría de estrellas del tamaño del Sol.

Si la masa inicial de una estrella fuera mucho mayor que la del Sol, la presión de los electrones no sería suficiente en ningún momento para detener el colapso. El radio de la estrella pasaría rápidamente por el límite del millar de kilómetros y continuaría disminuyendo hasta que las presiones gravitatorias fueran tan grandes que los electrones tendrían literalmente que meterse dentro de los protones, formando un cuerpo pequeño pero increíblemente pesado de materia constituida por neutrones sólidos. Los neutrones, como los electrones obedecen el principio de Pauli, pero son casi dos mil veces más pesados. Esta diferencia entre las dos partículas significa que un gas de neutrones tendría que comprimirse hasta un volumen miles de veces inferior al del correspondiente gas electrónico para ejercer la misma presión. Por lo tanto, la incapacidad de los electrones para contrarrestar la gravedad en las estrellas grandes significa que el colapso continuará hasta que se forme un cuerpo de sólo unas decenas de kilómetros de diámetro. En este punto la estrella estará compuesta casi totalmente de neutrones. Como es lógico se da a este cuerpo el nombre de estrella de neutrones. Se han observado en los cielos muchos objetos de este tipo.

Si la masa de la estrella es tan grande que la gravedad puede superar la presión neutrónica del mismo modo que superó la presión electrónica al formarse la estrella de neutrones, nada puede ya detener su acción y la estrella continuará su colapso hasta convertirse en un objeto llamado agujero negro. Cuando se ha formado un agujero negro, las fuerzas gravitatorias en su cercanía son tan fuertes que ya no puede escapar nada de él, ni siquiera la luz.

Nuestra historia sobre los gigantes nos ha conducido a las enanas blancas, a las estrellas de neutrones y a los agujeros negros, o sea, a algunos de los objetos más exóticos del Universo.

XI. ¿POR QUÉ EL CIELO ES AZUL?

Leí recientemente un estudio donde un psicólogo del desarrollo afirmaba que los niños de unos tres años de edad hacen más de cuatrocientas preguntas en un sólo día. Nadie que haya sido padre pretenderá dudar de esta cifra, algunos podrían incluso considerarla demasiado baja. «¿Por qué el cielo es azul?» es un ejemplo típico de pregunta infantil. El color del cielo es un fenómeno familiar, algo que vemos cada día, y, sin embargo, para contestar a la pregunta hay que seguir razonamientos bastante complicados.

El problema se complica por otro factor que se ha hecho familiar en la última década. Por encima de la atmósfera terrestre el cielo no es azul, sino profundamente negro. Las películas que han traído a la Tierra los satélites en órbita y la lanzadera espacial han convertido este hecho en un elemento más del arsenal de conocimientos de los jóvenes, y en algo que tenemos que explicar.

La diferencia en el aspecto del cielo según se mire por encima o por debajo de la atmósfera terrestre indica que la respuesta a nuestra pregunta nos obligará a emprender una investigación sobre la interacción de la luz con la materia (especialmente con la materia que constituye la atmósfera terrestre). La discusión de la interferencia expuesta en el capítulo 4 nos demostró que en la mayoría de situaciones corrientes es útil describir la luz como una onda. La materia con la cual interacciona la luz solar en la atmósfera puede dividirse en dos categorías. En primer lugar, hay moléculas de oxígeno, nitrógeno y otros gases.

Estas moléculas suelen ser miles de veces más pequeñas que la longitud de onda de la luz. Al mismo tiempo hay muchos tipos de partículas flotando en el aire, como hemos descubierto para preocupación nuestra en esta época de conciencia ecológica. Estas partículas son mucho mayores que la longitud de onda de la luz. Por lo tanto, para explicar el color del cielo tenemos que estudiar el comportamiento de una onda luminosa que atraviesa un medio compuesto de una mezcla de objetos muy grandes y muy pequeños,

donde, los adjetivos *grande* y *pequeño* se definen en relación a la longitud de onda de la luz.

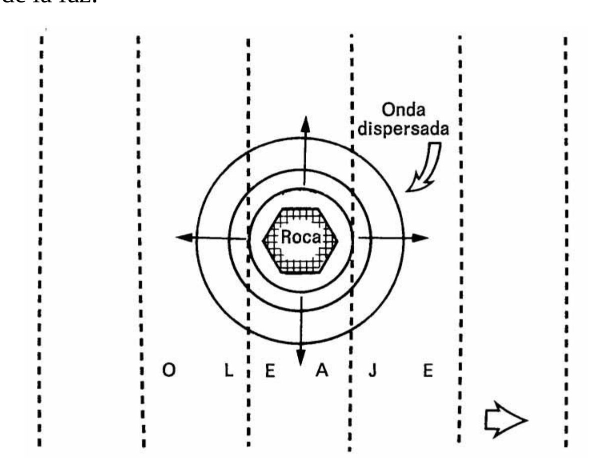


Fig. 82

La mejor manera de enfrentarse con este problema es imaginar una situación análoga con una onda que podamos visualizar. Supongamos que estamos sobre un acantilado a la orilla del océano, observando el oleaje que se acerca a la playa. En un día típico, la distancia entre las crestas (es decir, la longitud de onda) podría ser de unos tres metros. Si hay una roca a poca distancia de la orilla, tendremos una situación parecida a la de la figura 82. El oleaje incidente pasará de lado por la roca, pero también se producirá una onda secundaria centrada en la roca. Decimos que la roca dispersa la onda incidente, y la onda que se aleja de la roca formando círculos concéntricos se llama onda dispersada. Pronto veremos que el proceso crucial en la explicación del cielo azul es una dispersión similar.

En esta analogía el oleaje incidente juega el papel de la luz solar precipitándose sobre la atmósfera de la Tierra, y la roca juega el papel de la materia que encuentra en ella. Pero la analogía no es exacta, como ha demostrado nuestra explicación sobre el contenido de la atmósfera. Una roca cercana a la costa como la dibujada en la figura 82 puede tener desde un metro hasta decenas de metros de diámetro, aproximadamente la misma

dimensión que la longitud de onda del oleaje que ella dispersa. Sin embargo, en la atmósfera los centros de dispersión son proporcionalmente mucho más pequeños o mucho más grandes que las longitudes de onda de la luz.

Sabemos que una molécula del aire es aproximadamente mil veces más pequeña que la longitud de onda de la luz visible. En nuestro ejemplo, donde el oleaje tiene una longitud de onda de tres metros, un centro de dispersión análogo a una molécula de aire sería una «roca» con un diámetro de tres milímetros, casi el doble del tamaño de una mina de lápiz. Por lo tanto, las moléculas del aire actuarían como un bosque de diminutas agujas en el oleaje.

En cambio, la materia de las partículas aéreas forma grumos cuyo tamaño es de cincuenta veces a muchos miles de veces la longitud de onda de la luz. El obstáculo análogo a esta partícula sería una «roca» algo mayor que una manzana de casas.

Por lo tanto, preguntamos qué aspecto tendrá el cielo para una persona situada en la Tierra equivale a preguntar qué forma tendrán las olas que alcanzan la playa después de pasar por una «atmósfera» constituida por agujas muy apretadas entreveradas de vez en cuando por rocas enormes.

Será más fácil considerar separadamente estos dos componentes de la atmósfera. Conviene que actuemos así porque como veremos pronto, los detalles de la dispersión sufrida por la luz al chocar contra estos dos tipos de obstrucción difieren significativamente.

La luz es una onda electromagnética, es decir, que la onda está formada por un campo eléctrico oscilante, del mismo modo que una onda de agua está formada por una superficie líquida oscilante. Los átomos de la molécula sobre los cuales incide esta onda pueden considerarse como electrones ligeros, de carga negativa, unidos mediante un resorte a un núcleo positivo muy pesado. Cuando el campo eléctrico oscilante choca con el átomo, el electrón se mueve arriba y abajo como se movería un corcho impulsado por el oleaje. Pero en esta colisión el núcleo del átomo se mueve muy poco, debido a su masa (que podemos considerar anclada). Por lo tanto, el efecto de la luz consiste únicamente en que obliga a los electrones a moverse rápidamente arriba y abajo.

Un electrón acelerado de este modo emitirá una radiación. Cuando mayor sea la aceleración, mayor será la intensidad de la radiación. De modo

semejante los electrones empujados hacia arriba y hacia abajo a través de un hilo de antena producen transmisiones de radio y de televisión. Si el electrón oscila a las frecuencias adecuadas, emitirá luz en lugar de ondas de radio. Esta luz dispersada se alejará del átomo en círculos concéntricos de modo exactamente análogo a la onda de agua dispersada por la roca.

Podemos acercamos todavía más al tema del cielo azul pensando un poco en la unión que existe entre el electrón y el átomo. Si tenemos un resorte bastante duro y queremos que un peso situado sobre él oscile arriba y abajo, sabemos que existe una frecuencia que permite hacerlo con mucha facilidad. Si intentamos mover el peso con una lentitud o con una rapidez superiores a esta llamada frecuencia resonante, tendremos que trabajar más para que el resorte se mueva como nosotros queremos, y cuanto más lejos estemos de la frecuencia de resonancia, más energía necesitaremos para desplazar el extremo del resorte.

En la atmósfera la luz incidente intenta mover el extremo del resorte. En este caso la frecuencia de resonancia, la frecuencia a la cual resulta más fácil mover el electrón, está situada en la región ultravioleta, totalmente fuera de la gama visible. Esto significa que la luz con frecuencias situadas cerca del extremo azul del espectro podrá mover los electrones de los átomos con mayor facilidad que la luz de frecuencias más bajas situadas cerca del extremo rojo, simplemente porque la luz azul está más cerca de la frecuencia de resonancia.

Es de esperar, por lo tanto, que un electrón de un átomo sobre el cual incide luz azul resulte más acelerado que un electrón de un átomo idéntico bañado en luz roja. Sabemos que la intensidad de la luz emitida por el electrón depende de la aceleración y que la luz emitida es lo que llamamos onda dispersada, por lo tanto, lo lógico es que las moléculas atmosféricas puedan producir con mayor facilidad ondas de dispersión a partir de la luz azul que a partir de la luz roja. Por lo tanto, un rayo de luz azul dirigido hacia la atmósfera recorrerá una distancia relativamente pequeña antes de quedar completamente dispersado por los electrones de los átomos, mientras que un rayo de luz roja recorrerá un espacio mucho mayor antes de sufrir un destino semejante.

Si volvemos a nuestra analogía del oleaje, las agujas en el agua tienen la propiedad de producir ondas de dispersión mucho más fácilmente a partir de oleajes de corta longitud de onda (es decir, de ondas cuyas crestas están

más juntas) que de oleajes de longitud de onda larga. Si imaginamos que nuestro bosque de agujas se extiende muchos kilómetros mar adentro, resulta que en los días en que haya largos intervalos entre las crestas llegará a la playa una porción mayor del oleaje original que en los días en que esto no suceda.

Indiquemos ahora un hecho más importante. El Sol visto por encima de la atmósfera parece blanco; produce luz de intensidades aproximadamente iguales a lo largo de todo el espectro visible, desde el rojo al azul. Si imaginamos que la luz que llega del Sol es una mezcla de rayos de todos los colores distintos, el razonamiento que hemos expuesto significa que los rayos correspondientes a los colores cercanos al extremo azul del espectro quedarán eliminados de la luz directa solar por dispersión relativamente pronto, mientras que los rayos correspondientes a los colores cercanos al extremo rojo tenderán a conservarse enteros. Sabiendo esto podemos no sólo contestar la pregunta referente al cielo azul, sino explicar también algunas observaciones comunes.

Toda la luz que entra en la atmósfera terrestre procede del Sol. El hecho de que podamos ver luz cuando miramos en direcciones distintas a las del Sol significa que estamos viendo luz que procede por dispersión de la luz solar directa. Esto significa a su vez que la luz procedente de direcciones distintas de las del Sol tenderá a ser azul, puesto que las moléculas del aire dispersan con más facilidad la luz azul.

Esto explica también que el cielo visto desde la lanzadera espacial en órbita o desde la superficie de la Luna no sea azul sino negro. Si no hubiera una atmósfera que dispersara la luz solar, tampoco podrá existir la onda de dispersión que vemos en la figura 83. Si una persona mirara en dirección contraria a la del Sol no vería nada de luz, sólo un cielo negro con unas cuantas estrellas en él. Quienes han aterrizado con un avión después de anochecer en un día lluvioso conocen muy bien el hecho de que la luz sólo puede llegar a nosotros por dispersión (suponiendo que no miremos directamente a la fuente luminosa). Cuando se encienden los faros de aterrizaje del avión normalmente no los vemos desde las ventanillas de los pasajeros, porque el haz está dirigido hacia delante. Sin embargo, cuando el avión avanza a través de la lluvia, la luz es dispersada por las gotas y el haz de pronto resulta visible. El efecto resultante es que el pasajero ve y deja de ver alternativamente la luz de los faros de aterrizaje.

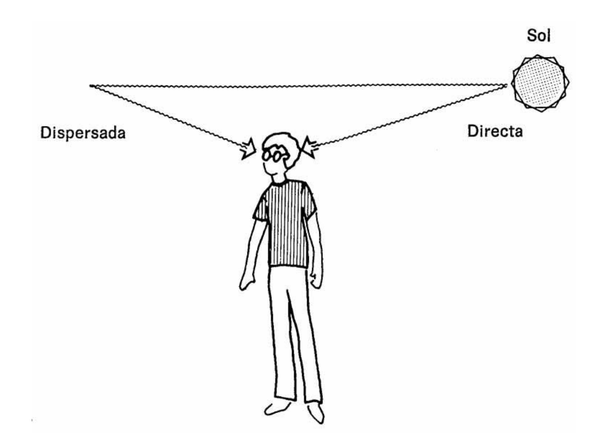


Fig. 83

Volviendo a la cuestión del aspecto del cielo, sabemos que la luz que nos llega directamente a través de la atmósfera sin sufrir dispersión será la luz original del Sol, blanca, con los colores del extremo azul del espectro eliminados del haz. Por lo tanto, cuanta más distancia tenga que atravesar la luz solar en la atmósfera para llegar a nuestros ojos, más desplazada nos parecerá del extremo azul. Cuando tenemos al Sol encima de la cabeza el tramo de atmósfera que ha de atravesar es relativamente reducido, por lo tanto, la luz diurna del Sol tiene un color amarillo. Sin embargo, cuando el Sol se pone, su luz recorre un tramo dentro del aire mucho más largo, por lo tanto será dispersada y eliminada del haz una parte mayor de la luz de frecuencias altas y el Sol parecerá rojo. La figura 84 muestra esta situación.

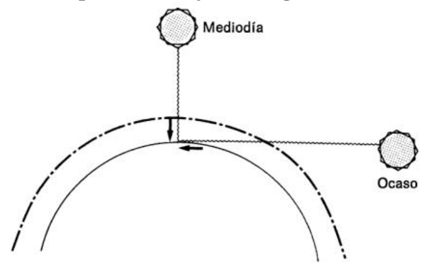


Fig. 84

El aspecto general del cielo diurno, un campo azul con un Sol amarillo, puede entenderse en función de la dispersión de la luz solar por las moléculas que forman la atmósfera. ¿Pero qué podemos decir del polvo y demás materia en forma de partículas presentes según sabemos en el aire? ¿Tienen algún efecto observable?

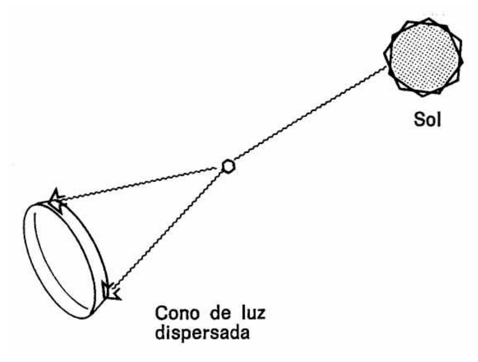


Fig. 85

Cuando la luz choca con un objeto grande, la mayor parte de la energía de esta onda incidente se dispersa formando un pequeño cono que apunta hacia delante en lugar de dispersarse en todas direcciones, y todos los colores se dispersan de modo igual. Podemos imaginar, por lo tanto, que los efectos de las partículas de materia en el aire no se sumarán al efecto del cielo azul. De hecho, las partículas toman la luz del Sol y la dispersan tal como está dibujado en la figura 85. Hay que sumar esta dispersión procedente de las partículas a la dispersión procedente de las moléculas, del mismo modo que el oleaje, en la analogía presentada anteriormente, sufre la dispersión tanto del bosque de agujas como de las rocas grandes. El efecto neto de estos dos tipos de dispersión aparece dibujado en la figura 86. Un observador que mire el cielo en direcciones distintas a las del Sol verá la luz azul ordinaria debida a la dispersión molecular. La presencia o ausencia de partículas no afectará este resultado. Sin embargo, si el observador mira al cielo cerca del Sol verá luz que ha sido dispersada fuera del haz incidente por las partículas del aire. Estas partículas dispersan de modo igual todas las longitudes de onda, por lo tanto, este cono de luz tendrá color blanco, y el Sol tendrá el aspecto dibujado a la derecha de la figura

86. Tendremos lejos del Sol un cielo azul que se transformará en un anillo brillante alrededor del Sol.

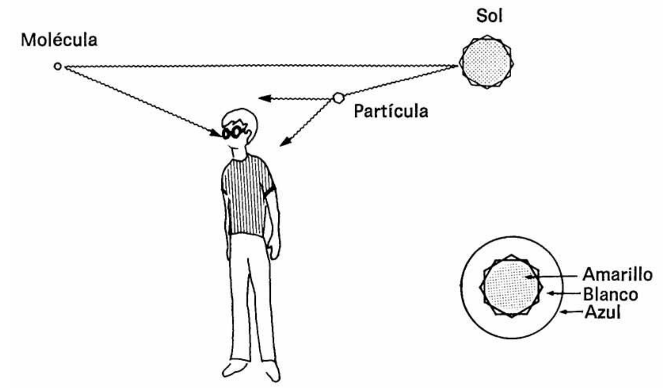


Fig. 86

Una advertencia importante. No hay que mirar NUNCA directamente al Sol, aunque se lleven gafas oscuras. Hacerlo puede provocar lesiones en el ojo o incluso ceguera permanente.

Es decir, que la presencia de partículas en el aire, contribuye al aspecto del cielo cerca del Sol. He observado que la zona brillante alrededor del Sol parece bastante más pequeña vista desde las altas montañas de Montana, donde suelo veranear. Gente que ha trabajado en expediciones científicas en la Antártida donde el aire es muy limpio me ha contado que allí la región brillante es casi inexistente, y que el cielo azul llega hasta el mismo borde del Sol. Estos dos hechos se entienden fácilmente si se recuerda que el aire limpio de las montañas de Montana (o de la Antártida) contiene relativamente pocas partículas, de modo que casi toda la luz dispersada proviene de las moléculas.

Pero después de explicar el aspecto que da al Sol la luz dispersada en la atmósfera vale la pena detenemos un momento y recordar un hecho importante. La mayor parte de la luz visible que entra en la atmósfera no sufre ninguna dispersión, sino que la atraviesa directamente. La atmósfera es un medio muy transparente, como podemos verificar nosotros mismos cuando miramos objetos lejanos. Por ejemplo, no es nada raro en Montana ver los perfiles de cordilleras situadas a más de 160 kilómetros de distancia, pero

no es preciso viajar a regiones relativamente despobladas para confirmar este fenómeno. En un día claro desde el balcón de los despachos de física teórica de Berkeley, en California, pueden verse las islas Farallón, a noventa kilómetros de distancia en el mar. Estas experiencias y otras semejantes nos indican que la luz puede recorrer grandes distancias a través de la atmósfera. Sabemos también que a alturas de 10.000 metros el aire está muy enrarecido, y deducimos de ello, que la luz puede recorrer a través del aire distancias mucho mayores que las necesarias para que la luz solar llegue hasta la superficie de la Tierra. Por lo tanto, aunque las moléculas de la atmósfera crean el cielo azul dispersando parte de la luz solar que la atraviesa, en realidad son centros de dispersión muy poco eficientes.

Según lo anterior, en la analogía del oleaje el bosque de agujas que representaba los centros de dispersión atmosférica deberían imaginarse en realidad como un bosque de algo mucho más poroso. Si podemos imaginar una aguja de tres milímetros fabricada con un material abierto como una red, tendremos una idea bastante aproximada de la capacidad de un átomo ordinario por dispersar una onda luminosa (o cualquier tipo de radiación electromagnética) que incide sobre ella.

Ya hemos explicado el motivo de esta poca eficacia. Cuando un electrón está ligado a un átomo, resulta difícil que la onda incidente consiga acelerarlo. El núcleo del átomo liga al electrón con demasiada fuerza y no le permite absorber ni reemitir mucha luz. Esto hace pensar que si los electrones se liberaran de los núcleos (como sucede, por ejemplo, a temperaturas muy altas) serían elementos dispersores de la luz mucho más eficientes.

Un medio donde los átomos se han disociado en electrones y núcleos se llama plasma. Los plasmas se crean de modo rutinario en nuestros laboratorios. También son bastante corrientes en el Universo. Las temperaturas elevadas existentes en la mayoría de estrellas (incluyendo el Sol) garantizan que la mayor parte del material que contienen esté en estado de plasma. Gracias a esto los científicos han tenido muchas oportunidades para estudiar la interacción de la radiación con los plasmas, y como era de esperar han descubierto que la radiación tiende a dispersarse mucho más si incide en electrones libres que en electrones ligados a los átomos.

Quizás el ejemplo más interesante de este proceso de dispersión ocurre en nuestro propio Sol. La radiación se genera en el núcleo del Sol por el proceso de fusión nuclear y empieza a fluir hacia fuera. No avanza en línea

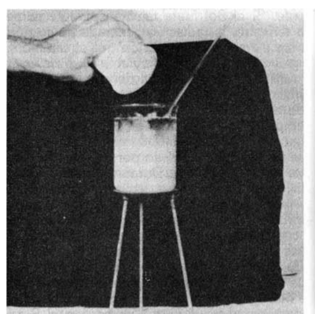
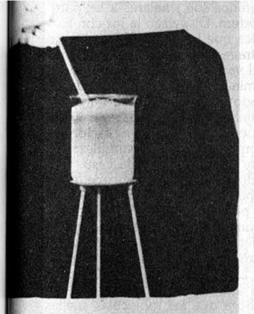
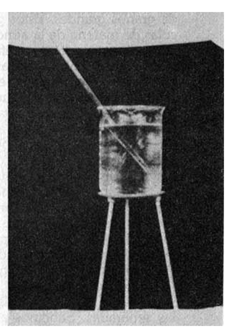
recta, como lo haría en la atmósfera de la Tierra, sino que el plasma la dispersa repetidamente. La luz en el vacío podría desplazarse del centro del Sol a su superficie, una distancia de 800.000 kilómetros, en menos de un milisegundo. Sin embargo, la dispersión en el plasma es tan intensa y el camino real en zigzag que sigue la luz es tan complicado que un poco de radiación tarda en realidad cerca de un millón de años en llegar hasta la superficie. La luz del Sol que cae hoy sobre nosotros empezó su viaje aproximadamente en la época en que el ¡*Homo sapiens* hizo su aparición sobre la superficie de la Tierra!

Si bombeamos agua dentro de un recipiente de donde no pueda salir fácilmente crearemos una alta presión, del mismo modo, el río constante de radiación producido por la reacción de fusión y descargado en el cuerpo del Sol crea una fuerza que tiende a reventar el Sol. Esta fuerza, la llamada presión de radiación, es lo que contrarresta la gravedad e impide que el Sol entre en colapso. La estabilidad a largo plazo del Sol se debe al equilibrio existente entre estos dos efectos. Se dice que un material en el que la luz se dispersa muy poco es transparente, porque la mayor parte de la luz que cae sobre él lo atraviesa. La falta de transparencia del material presente en el Sol es muy importante. Si el Sol fuera tan transparente como la atmósfera terrestre, la radiación generada en su núcleo escaparía sin ejercer mucha presión por el camino. En este caso la gravedad predominaría y el Sol sufriría un colapso.

La transparencia (o la falta de ella) en los materiales astronómicos jugó un papel muy importante en la historia inicial de nuestro Universo. Según la teoría, nuestro Universo empezó con una Gran Explosión (en inglés, Big Bang) hace de 10.000 a 15.000 millones de años, y en sus primeras fases estaba formado por un material inimaginablemente denso y caliente. Durante la primera décima de segundo, más o menos, las temperaturas eran tan altas que no podían existir ni átomos ni núcleos. La temperatura, por ejemplo, era entonces de 30.000 millones de grados centígrados, muy superior a la del centro de la estrella más caliente. La temperatura sólo bajó a 1.000 millones de grados cuando el Universo alcanzó los tres minutos de edad; entonces pudieron formarse núcleos estables de hidrógeno y de helio y la materia pudo existir en forma de plasma. La radiación creada en el Big Bang o Gran Explosión y los procesos nucleares consiguientes crearon una presión en este plasma, de modo parecido a la presión de radiación que

existe y se mantiene en el Sol. Esta presión impidió el colapso rápido del protouniverso por efecto de la gravedad y permitió que la expansión siguiera su curso.

Y el Universo siguió expandiéndose, durante miles de años. Durante todo este tiempo el plasma en expansión, que se iba enfriando, permaneció opaco a la radiación, y la presión de radiación impidió que se formaran cúmulos de materia como estrellas o galaxias. Algunos electrones de este plasma podían ocasionalmente combinarse con un protón o con un núcleo de helio para formar un átomo, pero las colisiones entre estos fragmentos de materia eran tan violentas que el electrón era expulsado inevitablemente al cabo de poco tiempo.

Una mezcla de azúcar y agua, inicialmente turbia, se vuelve transparente cuando el azúcar se disuelve. Un proceso similar tuvo lugar en las primeras fases de la historia del Universo. Fotos de Judith Peatross.

Se alcanzó entonces un punto crítico de gran importancia. Cuando el proceso de enfriamiento hubo seguido su curso, unos quinientos mil años, la temperatura bajó tanto que los electrones pudieron mantenerse unidos a los átomos a pesar de las colisiones. El plasma desapareció y lo sustituyó un conjunto de átomos no muy distinto del bosque de agujas de nuestro modelo del oleaje. El material del Universo se hizo transparente a la radiación, dejó de existir una presión de radiación capaz de contrarrestar el efecto de la gravedad y pudo iniciarse el lento colapso de materia que conduciría a la formación de galaxias, estrellas y planetas. Sabemos que la radiación difícilmente consigue acelerar un electrón ligado, y a no ser por

esto la presión de radiación del primitivo Universo podría haberse mantenido tan alta que hubiese impedido el colapso gravitatorio. En tal caso, quizá no se hubiese formado ninguna galaxia.

Los astrofísicos, cuando hablan del proceso que unió los electrones con los átomos y que hizo transparente el material de universo, lo llaman desacoplamiento de la radiación y la materia. Una experiencia sencilla nos permite visualizar en cierto modo este proceso de desacoplamiento. Si mezclamos algo de azúcar con el agua de un vaso, observaremos que al principio la mezcla parece turbia. El azúcar hace traslúcida el agua clara porque, por lo menos al principio, permanece suspendido en el agua en forma de granos grandes. Estos granos son similares a las partículas de materia de la atmósfera. Dispersan la luz con bastante eficacia, y esto significa que la luz que entra por un lado del vaso no podrá atravesar nuestra mezcla sin ser dispersada, y si miramos el vaso contra una bombilla veremos una especie de iluminación difusa. La mezcla de agua y azúcar en este estado es en cierto modo análoga al primitivo Universo. En ambos casos el espacio está lleno de un material que puede dispersar la radiación de modo eficiente, aunque como es lógico la naturaleza del material dispersivo sea muy diferente en cada caso.

Si continuamos agitando la mezcla al cabo de poco tiempo se volverá bruscamente transparente. Si levantamos el vaso contra la luz, podremos ver la bombilla con toda claridad. Desde el punto de vista óptico no habrá ahora ninguna diferencia detectable entre la anterior mezcla traslúcida y el agua corriente. La causa de esta transformación es muy simple. Los granos grandes de azúcar se disuelven y entran en la solución en forma de moléculas separadas. Sabemos ahora que las moléculas sueltas dispersan muy poco la luz; por lo tanto, no pueden afectar la luz que atraviesa la mezcla. El repentino aclarado que observamos en el vaso es, pues, una buena analogía de la repentina transparencia que reinó en el Universo cuando la radiación y la materia se desacoplaron.

Cuando estemos sentados de nuevo en un restaurante agitando el azúcar que hemos puesto en nuestro té helado, podemos hacer una pausa y recordar que la transformación que observamos en nuestro vaso no es muy diferente del proceso que permitió la formación de estrellas y de planetas a partir de la materia primordial procedente del Big Bang.

XII. LA GRAN UNIFICACIÓN

Una de las escenas divertidas del programa Apolo se produjo cuando el astronauta Alan Shepard cogió un palo de golf y dio el primer golpe en la Luna. Nadie se sorprendió de que la bola llegara mucho más lejos que en la Tierra. Todos sabemos que esto se debe a que las cosas pesan menos en la Luna. Para decirlo de otro modo: la fuerza de la gravedad es menor en la Luna que en la Tierra.

¿Pero qué es exactamente la gravedad? Aristóteles enseñaba que todo estaba lleno de una especie de fuerza motriz que impulsaba los objetos a buscar el centro del Universo: un punto que los griegos identificaban con el centro de la Tierra. Según este razonamiento, un objeto pesado tendría más fuerza motriz, y por lo tanto debería caer a la Tierra con mayor rapidez que un objeto más ligero. Según cuenta el folklore, Galileo fue el primero en demostrar que esta idea era falsa tirando pesos desde la torre inclinada de Pisa. Es fácil demostrar que Galileo no pudo nunca haber realizado este experimento concreto. La fuerza de resistencia del viento durante la caída habría hecho que el peso más pesado llegara antes al suelo, confirmando, en vez de refutando, las enseñanzas de Aristóteles. Pero Galileo, por el sistema que fuere, descubrió que la velocidad de caída de un objeto en la Tierra, ignorando los efectos secundarios como la resistencia del viento, es la misma para todas las cosas.

Quedó para Isaac Newton la tarea de formular la ley de la gravitación en su forma moderna. Tanto si se inspiró para ello en la caída de una manzana, como si la inspiración le vino de otro lugar, el resultado fue una de las leyes de mayor trascendencia de la ciencia moderna. Esta ley afirma que entre dos objetos cualesquiera del Universo dotados de masa existe una fuerza que tiende a tirar del uno hacia el otro, una fuerza que llamamos gravedad. Cuando más masa tengan los objetos y más próximos estén, mayor será la fuerza. La ley de Newton para dos masas m_1 y m_2 en el lenguaje matemático que los físicos utilizan se suele formular del modo siguiente:

$$F = G\,\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Esta fórmula expresada en palabras dice que F, la fuerza de la gravedad entre dos objetos cualesquiera puede calcularse mediante los siguientes pasos: 1) multiplicamos las masas de los dos objetos; 2) dividimos por el cuadrado de la distancia entre ellos, y 3) multiplicamos el resultado por una constante universal, G, llamada constante gravitatoria. En el sistema de unidades donde la masa se mide en kilogramos y la distancia en metros, G tiene el valor numérico de $6{,}67\times10^{-11}$.



Esta imagen de televisión de la misión Apolo 14 a la Luna muestra al astronauta Alan B. Shepard, Jr., preparándose para golpear una pelota de golf. Shepard utilizó un hierro real del seis sujeto al extremo de un mango para el retorno de muestras en caso de contingencia, y una pelota de golf auténtica. Foto cedida por la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio.

Lo primero que notamos sobre la fuerza de la gravedad es que es muy pequeña, puesto que la constante G tiene diez ceros a la derecha de la coma decimal antes de que aparezca la primera cifra. La segunda cosa a notar es

que la fuerza de la gravedad actúa entre dos objetos *cualesquiera* del Universo, por pequeños que sean o alejados que estén uno de otro. No es algo privativo de cuerpos grandes como la Tierra.

Por ejemplo una persona que pesa 80 kilogramos tiene una masa de 80 kilogramos y el presente libro tiene quizás una masa de medio kilogramo. Si esta persona permanece a un metro de distancia del libro existirá una fuerza que tirará de ella hacia el libro y una fuerza que tirará del libro hacia la persona. Éste es exactamente el mismo tipo de fuerza que nos mantiene sujetos a la Tierra y nos impide salir flotando al espacio. Es la fuerza de la gravedad. Nosotros no podemos sentir la atracción gravitatoria del libro porque es muy pequeña y vale unas cinco mil millonésimas de kilo. Se necesitaría un instrumento de medición de gran precisión para captarla y nuestros sentidos cinestésicos, relativamente bastos, no están a la altura.

La ubicuidad de la fuerza gravitatoria sirve a veces para que los astrólogos justifiquen su teoría de que las posiciones de las estrellas y de los planetas en el momento del nacimiento ejercen una influencia en la vida de una persona. Según este argumento, puesto que la fuerza de la gravedad actúa por lejos que esté el cuerpo influenciador, no podremos negar la posibilidad de que los planetas y las estrellas cercanas tengan alguna influencia sobre los destinos humanos.

Este argumento, como tantos argumentos pseudocientíficos, parece razonable hasta que uno se para a estudiarlo detenidamente. Según la ley de la gravedad de New- ton, es evidente que una estrella del tamaño del Sol (2 x 10^{30} kg) situada a una distancia de cinco años luz ($3{,}8\times10^{16}$ metros) ejercerá una fuerza gravitatoria sobre un recién nacido en el momento de su nacimiento. Pero también la ejercerá cualquier otro objeto del Universo, incluyendo un doctor de 100 kg situado a 1 metro de distancia del bebé. Si utilizamos la ley de Newton para calcular las intensidades relativas de las fuerzas ejercidas por el doctor próximo y por la estrella lejana encontraremos el siguiente resultado:

$$\frac{F_{\text{doctor}}}{F_{\text{estrella}}} = \frac{2.7 \times 10^{-8}}{3.7 \times 10^{-13}} \approx 10^5 = 100.000$$

Dicho con otras palabras, basta que el doctor desplace su peso de un pie al otro durante el parto para que ejerza sobre el recién nacido una fuerza gravitatoria 100.000 veces superior a la ejercida por la estrella más cercana. A esto conduce utilizar a Newton para «demostrar» la verdad de la astrología.

La pequeñez de la fuerza gravitatoria significa que para producir un efecto gravitatorio considerable hay que reunir grandes cantidades de materia. Quien haya subido alguna vez una maleta pesada por un tramo de escaleras sabe que la gravedad es una fuerza con la cual hay que contar en la Tierra, y el motivo de su importancia en nuestras vidas diarias es muy sencillo. Pasamos estas vidas situados a unos 6.400 kilómetros del centro de una masa muy grande (la Tierra), y la ecuación de Newton nos dice que las masas grandes ejercen fuerzas grandes. La Luna tiene bastante menos masa que la Tierra, por lo tanto el hecho de que pueda tirarse una pelota de golf a mayor distancia en la superficie lunar deriva también directamente de la ley de Newton.

Pero este argumento tiene un aspecto importante que a menudo se omite en los tratados modernos de gravedad. La ley de Newton es importante desde un punto de vista filosófico no porque nos dé una fórmula precisa para calcular fuerzas, sino porque fue la primera ley de la naturaleza realmente *universal* que descubrió la raza humana. Cuando hablamos de tirar una pelota de golf en la Luna formulamos una suposición al parecer tan obvia que apenas somos conscientes de ella. Suponemos que la ley de la gravedad que actúa en la Tierra también actúa en la Luna: que la gravedad es la misma en todas partes. Sin embargo, hace unos cuantos centenares de años y durante la mayor parte de la historia intelectual de la raza humana, esta suposición hubiera sido rechazada de plano. Los grandes filósofos griegos pensaban que los cielos se regían por las leyes de la geometría, leyes accesibles a la pura razón, mientras que las cosas terrenales, compuestas de materia corruptible se comportaban de manera muy distinta. Un buen ejemplo de esta preocupación por la perfección de los cielos es su afirmación de que los planetas se movían en círculos perfectos impulsados por el giro de esferas celestiales. La idea de que la fuerza que hace caer una manzana y la fuerza que mantiene a la Luna en su órbita es la misma les habría parecido ridícula.

No son importantes los detalles de cómo llegó Newton a pensar que las dos fuerzas eran iguales. Basta recordar para nuestro propósito que Newton pensó que había verificado su ley cuando calculó la órbita de la Luna y comprobó que, dentro de una incertidumbre experimental bastante grande, concordaba con la observación. Newton al reunir de este modo lo terrenal y lo celestial llevó a cabo la primera gran unificación de la historia de la ciencia. Dos campos que parecían diversos resultaban ahora gobernados por una única ley, y quedaba borrada una distinción artificial en las mentes de las personas.

La siguiente gran unificación de la física empezó a producirse pasado más de un siglo desde Newton. La nueva unificación reunió dos fenómenos que son claramente distintos: la electricidad y el magnetismo. Ambos fenómenos se conocían desde hacía mucho tiempo. Los griegos sabían perfectamente que las piedras imán podían atraer trozos de metal. Corría incluso la leyenda de que en algún lugar del Mediterráneo existía una isla compuesta completamente de este material, y de que el buque desgraciado que se le acercaba perdía todos sus clavos por la atracción magnética de la isla. En la época medieval, los chinos construyeron una brújula utilizable basada en el hecho de que una piedra imán en forma de aguja señala siempre hacia el polo norte, idea que los navegantes europeos perfeccionaron mucho antes de la era de las exploraciones y durante ella. Es decir, que a principios del siglo XIX se habían acumulado muchos conocimientos empíricos sobre el comportamiento de los imanes.

El desarrollo de la ciencia de la electricidad fue algo más lento, principalmente porque faltaban aplicaciones prácticas como la brújula para impulsarlo. Los griegos sabían que ciertos materiales como el vidrio y el ámbar al restregarse adquirían la capacidad de atraer trocitos de materia. Si nos peinamos un día seco y luego acercamos el peine a unos papelitos veremos el mismo efecto. Este fenómeno, que ahora llamamos electricidad estática no se convirtió en un tema importante de investigación científica hasta bien entrado el siglo XIX. Los «electricistas» de aquel siglo se dedicaban a sus estudios principalmente por curiosidad científica. El descubrimiento de la naturaleza eléctrica del rayo por Benjamín Franklin condujo al primer aparato eléctrico práctico, el pararrayos. Pero a fines del siglo pasado, los aspectos prácticos de la protección contra los rayos y el desa-

rrollo de aparatos como la batería eléctrica habían impulsado tanto el conocimiento de la electricidad que esta ciencia podía considerarse tan bien asentada como el magnetismo.

Lo importante con respecto a esto no son los detalles conocidos en estas dos disciplinas, sino que no había absolutamente ningún motivo para sospechar que estuvieran relacionadas de algún modo. Al fin y al cabo ¿qué relación tiene el comportamiento de una pieza de hierro magnetizado en la brújula con el hecho de que unos trocitos de papel se peguen a un peine? Los fenómenos relacionados con las dos ciencias parecen tan dispares que sólo nuestros conocimientos actuales nos obligan a discutirlos en el mismo capítulo. Sin embargo, una serie de descubrimientos experimentales y teóricos conseguidos a mediados del siglo XIX demostraron que la electricidad y el magnetismo no sólo están relacionados entre sí, sino que pueden considerarse aspectos diferentes del mismo proceso fundamental en la naturaleza.

El descubrimiento que tipifica esta unificación corrió a cargo, en 1820, del físico danés Hans Christian Oersted, quien descubrió que si se conecta un cable a una batería de modo que circulen por él cargas eléctricas, al acercar una brújula al cable ésta se desviará. La brújula se comporta como si la hubiéramos acercado a un gran imán. Este descubrimiento forma la base del electroimán discutido en el capítulo 6, pero tiene también una profunda importancia filosófica. Demuestra que hay una relación fundamental entre los fenómenos eléctricos y magnéticos: una relación desconocida antes del descubrimiento de Oersted. Se descubrieron luego otras relaciones. Por ejemplo, se vio que al mover un imán cerca de un bucle de hilo empezaban a circular corrientes eléctricas por este hilo. Se descubrió que un campo eléctrico cambiante podía producir también efectos magnéticos. La electricidad y el magnetismo en lugar de mantenerse como disciplinas separadas y distintas se iban interrelacionando cada vez más.

Esta unidad quedó formulada del modo más completo en 1865 cuando el físico escocés James Clerk Maxwell publicó unas ecuaciones conocidas hoy como ecuaciones de Maxwell. Estas ecuaciones resumían todo lo que se conocía sobre la electricidad y el magnetismo y confirmaban de modo definitivo que era imposible describir una disciplina sin que interviniera la otra. Es difícil imaginar una prueba más convincente de que los dos efectos son, en realidad, aspectos de un único fenómeno natural.

La unificación primera de la gravedad efectuada por Newton había permitido el desarrollo de algunas aplicaciones prácticas, como la teoría de las mareas, y pronto la unificación electromagnética produjo también resultados importantes. Por ejemplo Maxwell pudo demostrar que su ecuación implicaba la existencia de ondas con propiedades eléctricas y magnéticas que se desplazarían a través del espacio libre a la velocidad de la luz, pero que tendrían diferentes longitudes de onda, según fuera la naturaleza de la perturbación eléctrica que las creara. Estas ondas se llaman actualmente ondas de radio, y su descubrimiento y utilización a fines del siglo XIX inició la moderna revolución de las comunicaciones. Vemos, pues, que la idea de la unificación en la naturaleza tiene una profunda importancia en sentido filosófico, pero que también ha producido siempre resultados prácticos en el pasado.

El éxito de este tipo de unificación hizo que los científicos se plantearan la posibilidad de encontrar una unificación más, entre la gravedad y la electricidad. A fines del siglo XIX muchos personajes brillantes dedicaron mucho tiempo a buscar teorías en las que la gravedad y el electromagnetismo fueran aspectos diferentes de una única fuerza, como la teoría de Maxwell hace con la electricidad y el magnetismo. Tales teorías, cuando existen, se llaman normalmente teorías unificadas, o quizá teorías unificadas de campo, porque, en general, nos referimos a campos electromagnéticos y gravitatorios. En el siglo XIX, la voluntad de unificar la gravedad con el electromagnetismo produjo teorías basadas en las leyes de Newton del movimiento mecánico. En el siglo actual tanto Albert Einstein como Werner Heisenberg (uno de los fundadores de la moderna teoría cuántica) pasaron la parte final de sus vidas intentando encontrar caminos diferentes para la unificación. Pero durante la mayor parte del siglo XIX, esta particular investigación quedó prácticamente fuera de la corriente principal del pensamiento científico. Un motivo de ello era que a los científicos, preocupados por la tarea de investigar el mundo recién descubierto del átomo y del núcleo, no les quedaba tiempo para dedicarse al problema. Otro motivo era que a medida que aprendíamos más cosas sobre el átomo y su núcleo íbamos descubriendo que en el mundo hay fuerzas que los físicos clásicos no habían ni soñado.

Las nuevas fuerzas se llaman la fuerza fuerte y la fuerza débil, y juegan sus papeles más importantes en el reino del núcleo atómico y de las partículas de su interior. La fuerza fuerte puede concebirse como una especie de cola que mantiene unidos en el núcleo a los protones y a los neutrones, unidos dentro de un objeto de unos 10^{-13} cm de diámetro. Utilizamos aquí el adjetivo *fuerte* porque esta fuerza ha de vencer las enormes fuerzas repulsivas eléctricas que existen entre las partículas de carga positiva, los protones, cuando se les obliga a estar juntos. En cambio la fuerza débil rige la desintegración radiactiva de algunos núcleos y partículas inestables. Se le aplica el término *débil* porque a veces la desintegración tarda mucho en cumplirse, y los físicos interpretaron este hecho en el sentido de que la fuerza que impulsaba la desintegración no podía ser muy potente.

Cuando se hubieron añadido estas dos fuerzas a la lista existente, el panorama de la unificación se hizo muy negro. No sólo su presencia duplicaba el número de fuerzas por unificar, sino que las fuerzas eran tan diferentes unas de otras que de entrada parecía imposible que pudieran unificarse del mismo modo que la electricidad y el magnetismo. El hecho de que una persona de la capacidad de Einstein pudiera pasarse treinta años en la infructuosa búsqueda de una teoría unificada de campo se consideró una indicación muy convincente de que una teoría así simplemente no existía, y de que la naturaleza tenía que explicarse en función de cuatro fuerzas fundamentales, pero distintas.

Las diferencias entre estas fuerzas son realmente sobrecogedoras. Por ejemplo, la gravedad y el electromagnetismo pueden actuar a distancias muy grandes, como demostró nuestro ejemplo sobre la atracción gravitatoria de una estrella cercana. En cambio las fuerzas fuerte y débil actúan sobre distancias que son casi cien mil veces más pequeñas que el tamaño de un átomo. ¿Cómo podemos pensar que dos fuerzas sean la misma cosa si resulta que una actúa sólo a una distancia pequeña y la otra a cualquier distancia?

Otra diferencia importante es la intensidad relativa de estas fuerzas. La interacción fuerte, como su nombre indica, es la que puede producir los mayores efectos, aunque sólo actúe a distancias comparables con el tamaño del núcleo. La jerarquía de intensidades va bajando luego al pasar por las

fuerzas electromagnética, débil y gravitatoria. La siguiente tabla da las intensidades de las cuatro interacciones fundamentales en función de la de la fuerza fuerte.

Fuerza	*Intensidad relativa*
fuerte	1
electromagnética	1/137
débil	10^{-5}
gravitatoria	6×10^{-39}

Hay que decir finalmente, y quizá sea lo más importante, que las teorías que se han propuesto para explicar cada una de las cuatro fuerzas son muy diferentes. Explicamos en el capítulo 2 que la relatividad general, la teoría en la que se basan nuestras ideas modernas sobre la gravitación, deriva de consideraciones que son esencialmente geométricas. En cambio las modernas teorías sobre las tres fuerzas restantes se ocupan de un proceso microscópico llamado intercambio de partículas. Según este enfoque, la fuerza entre dos partículas dadas es consecuencia del intercambio de una tercera partícula. En términos gráficos las dos partículas se desplazan como muestra la figura 87, y en algún punto temporal de su recorrido, una tercera partícula es emitida por una de las dos y absorbida por la otra. El efecto resultante del intercambio es que se ha generado una fuerza, atractiva o repulsiva.

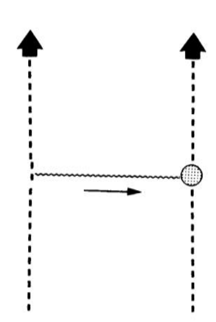


Fig. 87

La idea de que una fuerza se deba al intercambio de una partícula resulta de la teoría moderna y es algo difícil de visualizar. Quizá nos sea útil la

siguiente analogía. Imaginemos que dos personas patinando sobre el hielo se acercan de modo que una tenga que pasar a una determinada distancia de la otra. Cuando los dos patinadores están cerca, uno de ellos tira una bola de nieve al otro. El retroceso causado por el lanzamiento hará cambiar la dirección de movimiento del primer patinador como muestra la figura 88. También el segundo patinador, experimentará un retroceso en la dirección opuesta cuando coja la bola o sufra su impacto. Por lo tanto, el efecto general de tirar la bola de nieve es desviar los caminos de los patinadores, *exactamente como si hubiesen chocado entre sí.* Si se hubiese producido una colisión estaríamos de acuerdo en que los dos patinadores habrían ejercido fuerzas el uno sobre el otro, por lo tanto llegamos a la conclusión de que el intercambio de la bola de nieve produce el mismo efecto que una fuerza.

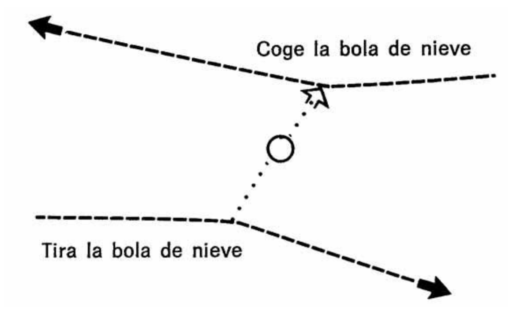


Fig. 88

En las teorías que se basan en el intercambio de partículas, las diferencias entre las interacciones están relacionadas con las diferencias entre las partículas intercambiadas para crear la fuerza. En general, cuanto más pesada es la partícula intercambiada, más corta será la distancia que pueda recorrer. Las fuerzas de corto alcance dependerán del intercambio de partículas pesadas, mientras que las fuerzas de largo alcance dependerán del intercambio de partículas ligeras. Consideramos el electromagnetismo asociado con el intercambio de una partícula llamada fotón. Ésta es la misma partícula que constituye la luz, las ondas de radio y los rayos X. Su masa en reposo es nula, y por lo tanto la fuerza tiene un alcance muy grande. (El concepto de masa nula parece de entrada algo raro. Para nuestros fines, imaginemos que una partícula de masa nula es algo que puede ejercer una

fuerza cuando choca con otra partícula pero que no pesaría nada si la pusiéramos en una balanza.)

La fuerza fuerte depende del intercambio de partículas de masa aproximadamente igual a la del protón y el neutrón, y tiene un radio de acción de 10^{-13} cm, aproximadamente el tamaño del núcleo atómico. La fuerza débil depende del intercambio de una partícula cuya existencia se ha predicho, pero que todavía no se ha observado en el laboratorio. Esta partícula recibe el nombre de bosón vector pesado y tiene una masa aproximadamente 100 veces la del protón. Por lo tanto, el radio de acción de la fuerza débil es de sólo unos 10^{-15} cm, considerablemente menos que el tamaño del núcleo. La figura 89 es un diagrama de cada una de estas tres fuerzas en función de los diagramas de intercambio de partículas.

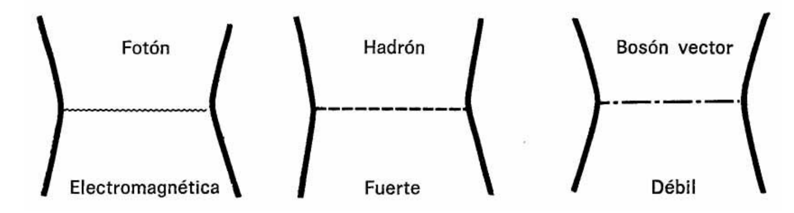


Fig. 89

Lo esencial en relación a estas tres fuerzas es lo siguiente: Recurrimos en cada caso al comportamiento de partículas elementales para explicar lo que sabemos sobre las fuerzas. Esto nos obliga necesariamente a recurrir a la mecánica cuántica, la ciencia que gobierna el mundo atómico y subatómico. *Toda* descripción de una fuerza según la mecánica cuántica supone un diagrama como el de la figura 89. No hemos incluido un diagrama para la cuarta fuerza, la gravedad, pero esto no significa que la gravedad sea fundamentalmente diferente a este respecto. Significa simplemente que todavía no poseemos una teoría de la gravedad que incluya la mecánica cuántica. Realmente todavía no sabemos cómo tratar la gravedad a escala atómica, y por lo tanto no sabemos describir y explicar la gravedad del mismo modo que las otras tres fuerzas. Algunos físicos dicen que algún día podremos explicar la gravedad en función del intercambio de una partícula de

masa nula llamada gravitón, pero uno de los grandes problemas por resolver de la física moderna es poner nuestro conocimiento de la gravedad a la misma altura que nuestro conocimiento de las demás fuerzas.

Esta diferencia fundamental entre la relatividad general (la gravitación) y las demás fuerzas puede explicar que Einstein fracasara en su intento de unificar todas las fuerzas en una teoría única, parecida a la relatividad. Quizás el fracaso se deba a haber escogido el camino más duro para unificar las fuerzas. El dato más importante en favor de esta última conjetura es que en la última década se han realizado enormes progresos en la búsqueda de una teoría unificada, pero este progreso se ha logrado trabajando con las tres fuerzas restantes, y de momento la gravedad ha quedado excluida de él.

En 1979 Abdus Salam, Sheldon Glashow y Steven Weinberg compartieron el Premio Nobel de Física por haber dado el primer paso hacia la unificación desde la época de Maxwell. Los tres demostraron que era posible disponer de una teoría en la cual las interacciones débiles y electromagnéticas fueran, en algún nivel fundamental, las mismas. ¿Qué podemos pensar de esta novedad en vista de lo ya dicho sobre la aparente disparidad entre estas dos interacciones?

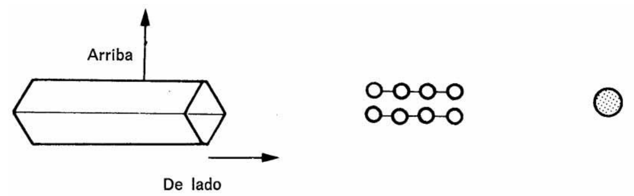


Fig. 90

Quizá nos sirva una analogía. Imaginemos un cristal, por ejemplo de sal gema ordinaria. Un cristal tiene una forma definida, como indica la figura 90. Los planos de los lados del cristal definen direcciones en el espacio, y la dirección que hemos nombrado ARRIBA es muy diferente de la que llamamos DE LADO. Parecería imposible ofrecer una explicación de la estructura del cristal con una teoría que no distinguiera entre ARRIBA y DE LADO.

Pero supongamos que observamos el cristal más de cerca. Si lo hacemos con un microscopio capaz de ver pequeños grupos de átomos, distinguiremos algo parecido a la figura central de la figura 90. Ya no vemos planos limpios, pero la imagen ampliada nos muestra todavía a los átomos dispuestos en direcciones concretas del espacio, y ARRIBA y DE LADO continúan siendo diferentes.

Aumentemos ahora la potencia de nuestro microscopio hasta poder observar un único átomo de cristal. Este átomo solo podría ser muy bien la esfera sin otros rasgos que aparece a la derecha de la figura 90. Esta esfera no tiene ninguna dirección preferente. El átomo es el mismo tanto si lo miramos en la dirección de ARRIBA como en la dirección DE LADO. En otras palabras, es posible describir un cristal que tiene una orientación clara en el espacio en función de átomos para los cuales todas las direcciones son idénticas. Para poder ver la simetría subyacente del cristal en apariencia asimétrico lo único que tenemos que hacer es mirar con un aumento suficientemente grande.

La idea de la unificación de las interacciones electromagnéticas y débiles es la misma. Las dos nos parecen muy diferentes, del mismo modo que ARRIBA y DE LADO parecen diferentes en el cristal. Pero del mismo modo que el cristal reveló una simetría subyacente cuando lo observamos muy de cerca, también esperamos que las fuerzas aparentemente diferentes revelen su similitud cuando dispongamos de suficiente ampliación. Éste es el enfoque seguido por la llamada teoría de Weinberg-Salam. Hemos indicado la relación existente entre la masa de la partícula intercambiada y el radio de acción de la fuerza con la cual se asocia. La masa y la energía están relacionadas, por lo tanto, no debería sorprendemos demasiado saber que el hecho de aumentar la potencia del «microscopio» utilizado para examinar las partículas elementales equivale a utilizar sondas de una energía cada vez mayor. Según la teoría, las interacciones débiles y electromagnéticas deberían empezar a manifestar su identidad cuando las energías de sondeo llegaran a unas cien veces la masa del protón. En este nivel de energía (que será posible alcanzar en unos cuantos laboratorios con grandes aceleradores) esperamos «ver» que las interacciones electromagnética y débil son idénticas, del mismo modo que el cristal revelaba una identidad subyacente entre ARRIBA y DE LADO en nuestro anterior ejemplo cuando lo examinamos a una escala suficientemente grande.

La teoría de Weinberg-Salam formula algunas predicciones sobre los resultados de experimentos con grandes aceleradores, y muchas de estas predicciones se comprobaron en el laboratorio a mediados de la década de 1970. Las predicciones se verificaron en todos los casos y la mayoría de físicos aceptan ya la teoría. El número de fuerzas fundamentales en la naturaleza ha quedado reducido con esta teoría de cuatro a tres. Ahora sólo tenemos la gravedad y las interacciones fuertes y «electrodébiles».

El éxito de la unificación electrodébil conduce a una pregunta obvia. Si al aumentar la potencia de nuestro microscopio hasta un determinado nivel descubrimos la identidad básica de dos interacciones que parecían distintas, ¿mostrará un aumento posterior de la potencia que la interacción fuerte también es idéntica? En otras palabras, ¿es posible que haya alguna energía en la cual las fuerzas fuerte, débil y electromagnética queden todas unificadas?

La búsqueda de una teoría que unifique estas tres fuerzas sigue a toda marcha en la física actual. Resulta que la energía necesaria para «ver» que las tres fuerzas son idénticas es unas 10^{13} veces la masa del protón, energía que será imposible de alcanzar en una máquina en un futuro previsible. Sin embargo, los autores de las llamadas teorías de la Gran Unificación han podido ofrecer algunas predicciones que pueden comprobarse con experimentos. La más interesante de estas predicciones se refiere a la estabilidad del protón. Según las teorías convencionales, el protón es absolutamente estable. No se desintegra, y cada uno de los protones existentes después del Big Bang continúa todavía existiendo en algún lugar u otro.

Sin embargo, si las interacciones fuerte y electrodébil son realmente la misma, ha de haber una diminuta probabilidad de que un protón se desintegre espontáneamente dando otro tipo de partícula. Estos procesos se dan continuamente en otras partículas, pero no se han observado nunca en el protón. Si resultara que el protón no fuera absolutamente estable, como antes se pensaba, la manera de medir esta inestabilidad inédita sería hablar de la vida del protón. Esta vida es el tiempo que tarda un protón dado en desintegrarse. Cuanto más largo es este tiempo, más estable nos parecerá el protón.

Se sabe en el momento de escribir este libro que la vida del protón debe de ser por lo menos de 10^{30} años, una cifra enorme comparada con los 10^{10} años que han transcurrido desde el Big Bang. Sin embargo, la teoría de la

Gran Unificación predice que la vida del protón debería ser de unos 10^{31} años, una cifra tentadoramente próxima al actual límite experimental. Pronto se dará a conocer una nueva ronda de experimentos sobre las vidas de los protones. Si se descubre que el protón se desintegra realmente (aunque raramente), el hecho dará un tremendo impulso a las teorías de unificación.

En el momento actual la búsqueda de la unificación se ha convertido en uno de los principales campos de actividad de la física moderna. Se han unificado ya tres de las cuatro fuerzas fundamentales. Nos quedan solamente dos interacciones básicas en la naturaleza: la electrodébil y la gravedad. Y quién sabe... Quizás incluso la gravedad se integrará con las otras en el curso de nuestra vida y se cumplirá el viejo sueño de explicar toda la naturaleza en función de una única fuerza.

EL PANORAMA INESPERADO

La naturaleza vista por un físico

JAMES S. TREFIL

Las preguntas más sencillas tienen en ocasiones las respuestas más complicadas. ¿Quién imaginaría que la pregunta infantil «¿Por qué el cielo es azul?» pudiera estar relacionada con procesos profundos como la formación de las galaxias en las primeras fases del Universo? ¿Puede haber alguna conexión entre un imán ordinario y un tren que se desplaza a 3.200 kilómetros por hora? ¿Y por qué no vemos nunca un arco iris en invierno?

El autor examina una serie de cuestiones cuidadosamente escogidas y explica cómo conciben los físicos modernos el mundo por ellos descubierto. Por ejemplo, el profesor Trefil inicia uno de sus viajes de exploración explicando cómo funciona un frigorífico corriente, luego pasa a describir los procesos termodinámicos y de allí, finalmente, a la discusión del destino final del Universo: se trata, desde luego, de un «panorama inesperado».

James S. Trefil es catedrático de física en la Universidad de Virginia (EE.UU.). Es autor de libros de texto de física y de más de 100 artículos, que han aparecido tanto en revistas especializadas como en revistas de divulgación (Science Digest, Saturday Review y Popular Science). Autor, también, de El momento de la creación y De los átomos a los quarks, ambos libros publicados en la colección Biblioteca Científica Salvat.

